Performance Modeling
of Computer Systems and Networks

Prof. Vittoria de Nitto Personè

Discrete Random Variates: applications

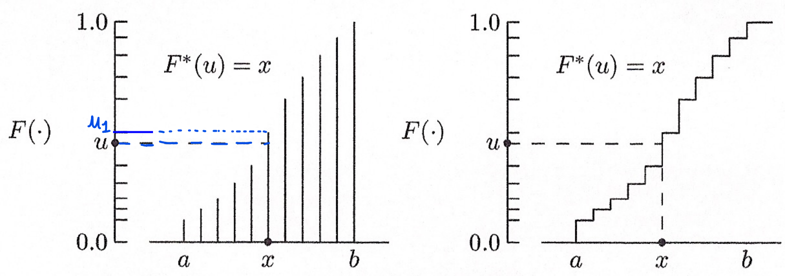
Università degli studi di Roma Tor Vergata
Department of Civil Engineering and Computer Science Engineering

1

Equilikely è la versione discreta dell'uniforme

Equilikely(a,b) $F(x) = \frac{x-a+1}{b-a+1} \quad x = a, a+1, \ldots, b$

$$F^*(u) = \min_x \{x : u < F(x)\}$$



$F(x\text{-}1) \le u < F(x) \longleftrightarrow \frac{(x-1)-a+1}{b-a+1} \le u < \frac{x-a+1}{b-a+1}$

Lehmer   da trovare

2

Minimo x tale per cui la F(x) sia maggiore di u.
Le due linee blu proiettate sulla 'x' ci dicono che tutti i valori lì dentro verranno associati ad 'u'.
F(x) = u1, ma quando faccio l'inverso ad 'u', perchè nell'inverso devo trovare l'ultima 'u' di cui F(x) è superiore, non posso prendere "u1", perchè violerei F(x) > u1, (in quanto F(x) = u1)

$$\frac{(\cancel{x-1})-a+\cancel{1}}{b-a+1} \le u < \frac{x-a+1}{b-a+1}$$

$$x-a \le (b-a+1)u < x-a+1$$

$$x \le a+(b-a+1)u < x+1$$

$$x = a+\lfloor (b-a+1)u \rfloor$$

$$F^*(u) = a+\lfloor (b-a+1)u \rfloor$$ = x dell'argomento

Questo è stato il primo modello usato, che sfruttava equilikely.

model 1

Example: Inventory System

in program sis2, the demand per time interval is an *Equilikely*(10,50) random variate

```
long Equilikely(long a, long b)
{  return (a + (long) ((b - a + 1) *
Random()));}

long GetDemand(void)
{
  return (Equilikely(10, 50)); }
…
 while (index < STOP) {
 index++;
 …
 inventory -= demand;}
```

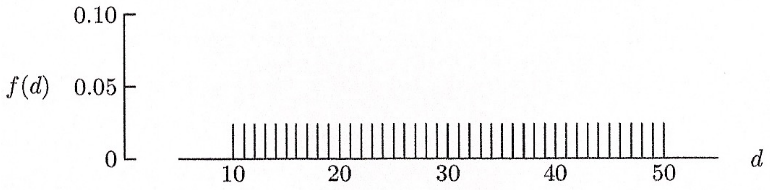
La media è 30, dispersione (standard deviation) 11.8.
Modello irrealistico, perchè tutte le azioni hanno stessa probabilità.

model 1

Example: Inventory System

- μ=30, $\sigma = \sqrt{140} \cong 11.8$, and the demand pdf is flat

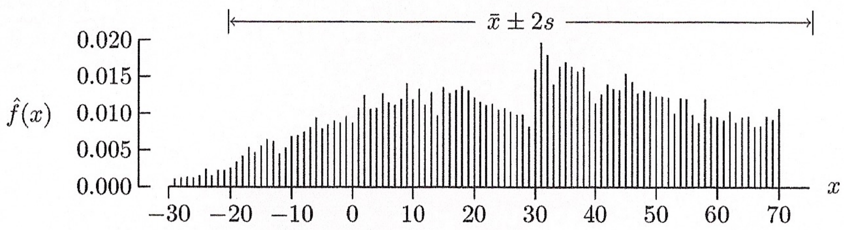
sembra strano che ho stessa probabilità di comprare 10 macchine che 50 macchine.



- this model is not very realistic

Example 3.1 sis2mod include gli istogrammi.

- Using sis2mod to generate 10000 weeks of sample data, the inventory level histogram from sis2.out can be constructed (s,S)=(20,80)



- *x* denotes the inventory level prior to review
- $\bar{x} = 27.63, \quad s = 23.98$
- about 98.5% of the data falls within $\bar{x} \pm 2s$ (vale Chebyshev)

Equilikely(10, 50) ? non va molto bene, come abbiamo visto prima è troppo piatta!

modello2: in una settimana ci possono essere 100 istanze possibili, su ciascuna metto probabilità 0.3 indipendente.
Una istanza è un punto nel tempo della settimana in cui posso fare domanda per una unità.
Questo 0.3 è "probabilità che richiesta ci sia". La media è 0.3*100 = 30, essendo una binomiale (100, 0.3).
Però adesso è troppo concentrata su media 30 (prima era tra 10 e 50).

model 2

Alternative Inventory Demand model

- 100 instances per time interval when demand for 1 unit may occur
- The probability of demand is 0.3 per instance (independently)

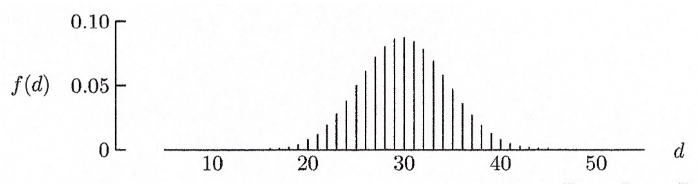
  This is *Binomial*(100,0.3) !

- the function `GetDemand` in sis2 becomes:

```
long GetDemand(void) {
        return (Binomial(100,0.3));
}
```

- μ=30, $\sigma = \sqrt{21} \cong 4.6$ and the pdf is:

standard deviation minore,
mi discosto meno dalla media.



7

La binomiale (n istanze, probabilità successo della singola istanza) (come 100 lanci di monete testa/croce).
La binomiale (30,p) è simile a Poisson(30), con "n" grande.

model 3

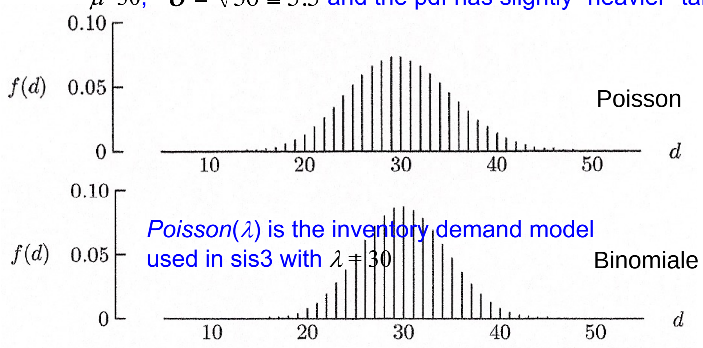
A *Poisson*(30) model

- *Binomial*(*n*,*p*) ≈ *Poisson*(*np*) for large n
- if *Binomial*(100,0.3) is realistic, should also consider *Poisson*(30)
- the function `GetDemand` in sis2 would be:

```
long GetDemand(void) {
        return (Poisson(30));
}
```

- μ=30, $\sigma = \sqrt{30} \cong 5.5$ and the pdf has slightly "heavier" tails:

le code si sono allungate.
Anche la deviazione std è un pò cresciuta.



8

Rilasso il vincolo della richiesta che deve essere unitaria, passo a 50 istanti POSSIBILI in cui la domanda ci può essere o meno. Per ogni istanza la quantità richiesta è modellabile con variabile geometrica che assume valore 0 (nessuna richiesta), 1, 2, 3 ...
50 variabile geometriche sommate formano una Pascal. La standard deviation sale, graficamente si appiattisce. Sempre a parità di media, quando faccio confronto SEMPRE A PARITA' DI MEDIA, sennò non ha senso.

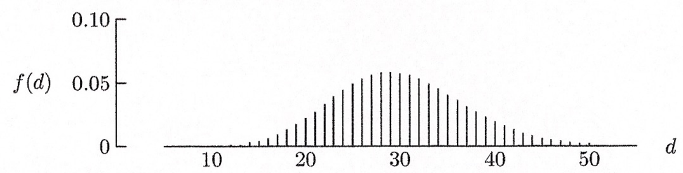
model 4

A *Pascal*(50,0.375) model

- 50 instances per time interval
- the demand per instance is *Geometric*(*p*) with p=0.375
- the function `GetDemand` in sis2 would be:

```
long GetDemand(void) {
        return (Pascal(50,0.375));
}
```

- μ=30, $\sigma = \sqrt{48} \cong 6.9$ and the pdf has heavier tails than the *Poisson*(30) pdf:



9

Invece di avere numero di istanze fisso, lo rendo randomico di media 50. Il resto non cambia. Il numero di richieste per singola istanza è sempre geometrica. Genero prima le istanze con Poisson, che poi tronco (ad esempio, impossibile che in una settimana non ci sia neanche un ordine). In Pascal ci metto istances = n° variabili geometriche generate, con rispettiva probabilità.

model 5

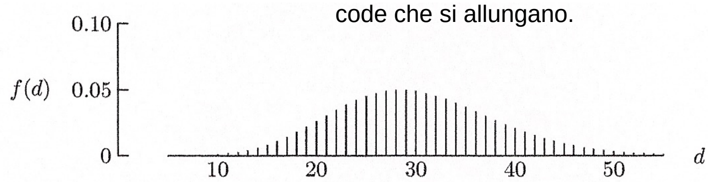
A compound demand model

- the number of demand instances per time interval is *Poisson*(50)
- the demand per instance is *Geometric*(*p*) with p=0.375
- the function `GetDemand` in sis2 becomes:

```
long GetDemand(void) {
        long instances = Poisson(50.0);   //must truncate to avoid 0
        return (Pascal(instances, 0.375));
}
```

- μ=30, $\sigma = \sqrt{66} \cong 8.1$ and the pdf has heavier tails

code che si allungano.



10

La densità è "composta": devo definire v.a. che include quantità domanda D e numero istanze I.
Lo faccio perchè adesso il contesto ho:
Ho degli intervalli I, randomico, non so quanti siano. In In ciascun intervallo posso ricevere un certo numero di domande. Se cerco f(d) sto cercando la densità calcolata per 'd'.
Ovvero: somma di: probabilità singola istanza * domande fatte nella singola istanza.

model 5

Discrete Simulation
Discrete RV applications

pdf for the compound demand

- define random variables
  - D: the demand amount
  - I: the number of demand instances per time interval

$$f(d) = \Pr(D=d) = \sum_{i=0}^{\infty} \Pr(I=i)\Pr(D=d|I=i) \qquad d = 0,1,2,\ldots$$

d domande

tutte le istanze tali che il numero di domande è "d". Devo troncare per non prendere 0.

- to compute $f(d)$, truncate infinite sum: $0 < a \le i \le b$

```
/* use the library rvms */
double sum = 0.0;
for (i = a; i <= b; i++)
        sum += pdfPoisson(50.0,i) * pdfPascal(i,0.375,d);
return sum;
/* sum is f(d) */
```

Prof. Vittoria de Nitto Personè 11

11

Nel sis2 avevamo
il modello Equilikely, che però era abbastanza limitato, poichè era spalmato in modo uniforme. Inoltre sis2 è guidata da interazione tra processi, non tempo.
Il modello sis3 invece è next-event con tempi di interdomanda esponenziali.

Next-Event simulation
InvSys

Comparison of Demand Models

sis2: used an *aggregate* demand for each time interval, generated as an *Equilikely*(10,50) random variate

- Aggregate demand per time interval is random
- Within an interval, time between demand instances is constant
- Example: if aggregate demand is 25, inter-demand time is 1/25=0.04

- Now (sis3) using *Exponential*($1/\lambda$) inter-demand times
  - Demand is modeled as an arrival process
  - Average demand per time interval is λ

sys3:
```
double GetDemand(void)/* ------------------------------------------------- *
                  generate the next demand instance (time) with rate 30 *
                  per time interval and exactly one unit of demand per  *
                  demand instance  * ----------------------------------*/
{ static double time = START;
  SelectStream(0);
  time += Exponential(1.0 / 30.0);
return (time);}
```

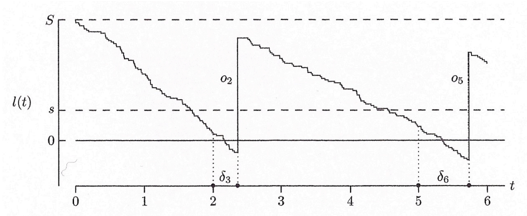
Prof. Vittoria de Nitto Personè 12

12

in questo modello:
- la domanda c'è con probabilità p.
- la possibilità di avere una domanda con >1 articolo è Geometric(p)

model 6

sis3



Program sis4

interdomanda:
tra una domanda e
l'altra.

- Based on sis3 but with a more realistic inventory demand model
- The inter-demand time is an *Exponential*($1/\lambda$) random variate
- Whether or not a demand occurs at demand instances is random with probability p
- To allow for the possibility of more than 1 unit of demand, the demand amount is a *Geometric*(p) random
- Expected demand per time interval is $\dfrac{\lambda p}{(1-p)}$

lambda = tasso arrivi

13

model 6

The auto dealership

- The inventory demand model for sis4 corresponds to λ customers per week on average
- Each customer will buy

probabilità geometrica

  - 0 autos with prob $(1-p)$
  - 1 auto with prob $(1-p)p$
  - 2 autos con prob $(1-p)p^2$, etc.
- with $\lambda=120$ $p=0.2$, average demand is 30 deve rimanere invariata.

$$30.0 = \frac{\lambda p}{(1-p)} = \lambda \sum_{x=0}^{\infty} x(1-p)p^x = \underbrace{\lambda(1-p)p}_{19.2} + \underbrace{2\lambda(1-p)p^2}_{7.68} + \underbrace{3\lambda(1-p)p^3}_{2.304} + \ldots$$

- $\lambda(1-p)=96.0$ customers buy 0 autos
- $\lambda(1-p)p=19.2$ customers buy 1 auto
- $\lambda(1-p)p^2=3.84$ customers buy 2 autos
- $\lambda(1-p)p^3=0.768$ customers buy 3 autos, etc.

96 utenti comprano 0 auto,
19.2 utenti ne comprano 1, etc...
IN MEDIA

14

Ma come faccio a capire se devo usare esponenziale, geometrica, etc.., parametri da usare? Esperienza, prelievo dati. Non c'è un manuale che mi dice cosa usare.

Per due processi stocastici diversi devo prendere due stream diversi.

model 6 sis4.c

uncoupled processes

```
double GetDemand(long *amount)
{
  static double time = START;
  SelectStream(0);
  time += Exponential(1.0 / 120.0);  /* demand instance */
  SelectStream(2);
  *amount = Geometric(0.2);          /* demand amount   */
  return (time);
}
...
if (t.current == t.demand) { /* process an inventory demand */
   sum.demand += amount;
   inventory  -= amount;
   t.demand    = GetDemand(&amount);
}
```

la domanda sum.demand viene incrementata di "amount"; non più di 1.

```
if (t.current == t.demand) { /* process an inventory demand */
    sum.demand++;
    inventory--;
    t.demand = GetDemand();
}
```

vecchia versione!!

sis3.c

Prof. Vittoria de Nitto Personè 15

15

Nel modello 6, con la geometrica, non c'è limite agli acquisti di auto. Non ha molto senso! Meglio troncare e far riferimento ad un range finito, posso partire da "a" e "b" e passare alle probabilità di coda, oppure partire dall'inversa. Nella slide successiva vediamo come applicarla al nostro modello.

Discrete Simulation
Discrete RV applications

Truncation: examples

- In the previous example, no bound on number of autos purchased
- Can be made more realistic by truncating possible values
- Start with random variable X with possible values $\chi=\{0, 1, 2, \ldots\}$ and cdf $F(x)=\Pr(X \leq x)$
- want to restrict X to the finite range $0 \leq a \leq x \leq b < \infty$
- if $a > 0$, $\alpha = \Pr(X < a) = \Pr(X \leq a\text{-}1) = F(a\text{-}1)$
- $\beta = \Pr(X > b) = 1\text{-}\Pr(X \leq b) = 1\text{-}F(b)$
- $\Pr(a \leq X \leq b) = \Pr(X \leq b) - \Pr(X < a) = F(b) - F(a\text{-}1)$

  essentially, always true iff $F(b) \cong 1.0$ and $F(a\text{-}1) \cong 0.0$

Prof. Vittoria de Nitto Personè 16

16

Parto da probabilità delle code, uso le inverse e calcolo i due punti 'a' e 'b'.
Posso fare verifica con cumulativa, e vedo che sia a destra che sinistra viene probabilità più piccola di alfa e beta. Stiamo escludendo una quantità piccola.

The auto dealership

model 5

- the number of demand instances per time interval is *Poisson*(50)
- the demand per instance is *Geometric*(*p*) with p=0.375

For the *Poisson*(50) random variable I, determine a and b so that

$$\Pr(a \leq I \leq b) \cong 1.0$$

- use $\alpha = \beta = 10^{-6}$ and `rvms`

```
a = idfPoisson(50.0, α);
b = idfPoisson(50.0,1.0 - β);
```

- results: $a = 20$, $b = 87$
- consistent with the bounds produced by the conversion:

$\Pr(I < 20)$ = cdfPoisson(50.0, 19) $\cong 0.48 \times 10^{-6} < \alpha$
$\Pr(I > 87) = 1.0$ - cdfPoisson(50.0, 87) $\cong 0.75 \times 10^{-6} < \beta$

17

model 5

Effects of truncation

- truncating *Poisson*(50) to the range $\{20, \ldots, 87\}$ is insignificant: truncated and un-truncated random variables have (essentially) the same distribution

18

COME FARE (E NON FARE) IL TRONCAMENTO

model 3

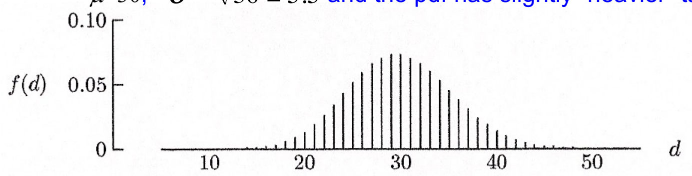
Discrete Simulation
Discrete RV applications

A *Poisson*(30) model

- *Binomial*(*n*,*p*) ≈ *Poisson*(*np*) for large n
- if *Binomial*(100,0.3) is realistic, should also consider *Poisson*(30)
- the function `GetDemand` in sis2 would be:

```
long GetDemand(void) {
        return (Poisson(30));
}
```

- μ=30, $\sigma = \sqrt{30} \cong 5.5$ and the pdf has slightly "heavier" tails:



Prof. Vittoria de Nitto Personè 19

19

Qui voglio troncare tra 20 e 40. Un primo approccio è quello nello snippet: in pratica tutti i numeri <20 e >40 li vado a "cumulare" proprio in 20 e 40. Ma questi sono valori limite, cosi facendo gli do rilevanza, io devo escluderli invece.

model 3

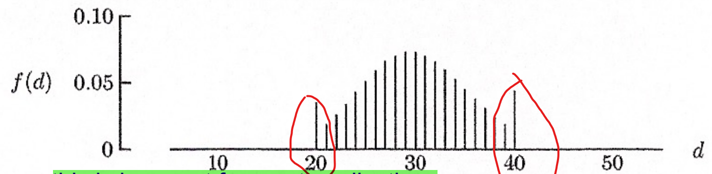
Discrete Simulation
Discrete RV applications

The auto dealership
incorrect truncation

- use *Poisson*(30) demand model in program sis2
- truncate the demand to the range $20 \le d \le 40$

```
d = Poisson(30.0);
if (d < 20)
        d = 20;
if (d > 40)
        d = 40;
return d;
```

- original left and right tails "grouped together" at 20 and 40



- this is incorrect for most applications

Prof. Vittoria de Nitto Personè 20

20

Come farlo CORRETTAMENTE?

model 3

Truncation by cdf modification

- troncate *Poisson*(30) to range $20 \le d \le 40$
- the *Poisson*(30) pdf is:

Qui normalizzo rispetto alla cumulativa che voglio usare. Quindi non cumulo sugli estremi, ma li "sommo uniformemente" su tutti. Sto normalizzando invece che metterla agli estremi.

$$f(d) = \exp(-30)\frac{30^d}{d!} \qquad d = 0,1,2,\ldots$$

$$\Pr(20 \le D \le 40) = \underset{\text{(Beta)}}{F(40)} - \underset{\text{(alfa-1)}}{F(19)} = \sum_{d=20}^{40} f(d) \cong 0.945817$$

- compute a new truncated random variable D_t with pdf $f_t(d)$

$$f_t(d) = \frac{f(d)}{F(40)-F(19)} \qquad d = 20,21,\ldots,40$$

Lo stesso posso fare sulla cumulativa.

model 3

Truncation by cdf modification

- the corresponding truncated cdf is

$$F_t(d) = \sum_{t=20}^{d} f_t(t) = \frac{F(d)-F(19)}{F(40)-F(19)} \qquad d = 20,21,\ldots,40$$

- mean and standard deviation of D_t

normalizzata, poco più piccole perchè sia hanno meno valori!

$$\mu_t = \sum_{d=20}^{40} d f_t(d) \cong 29.841 \qquad \sigma_t = \sqrt{\sum_{d=20}^{40} (d-\mu_t)^2 f_t(d)} \cong 4.720$$

- mean and standard deviation of *Poisson*(30)

non normalizzata $\mu = 30.0 \qquad \sigma = \sqrt{30} \cong 5.477$

Applico troncamento tramite inversa. Genero u = numero random, d = 30 è la media.
Applico l'algoritmo dell'inversa considerando LA MODA.
Se sto 'sotto u' (calcolato con random), allora incremento d fino a superare 'u'.
Altrimenti, se F(20)<=u, decremento d finchè non trovo F(d-1)<=u
Altrimenti ritorno 20. (condizione F(20)>u)

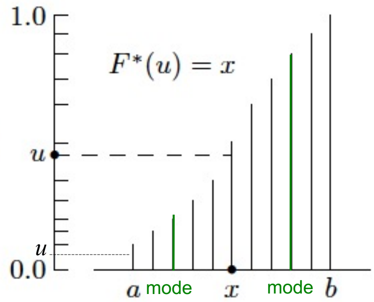
model 3

Truncation by cdf modification

- A random variate truncated to $20 \le d \le 40$ can be generated by inversion, using the truncated cdf $F_t(\cdot)$ and the Algorithm 2

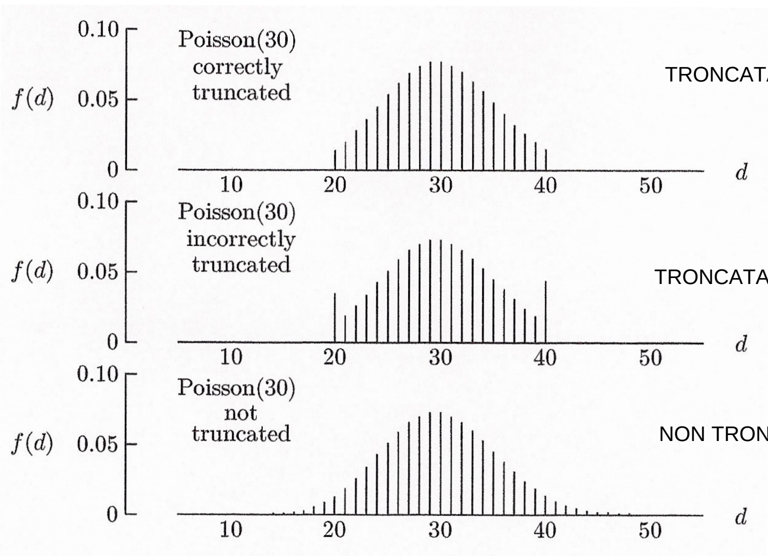
```
u = Random();
d = 30;
if (Ft(d) <= u)
      while (Ft(d) <= u)
            d++;
else if (Ft(20) <= u)
            while (Ft(d-1) > u)
                  d--;
      else
            d = 20;
return d;
```

condizione F(20)>u



"Cerco il minimo per cui
sia minore di u"

Illustration of pdfs



TRONCATA BENE

TRONCATA MALE

NON TRONCATA

Truncation - conclusion

see the book for the following

1. the truncation by cdf modification in general
2. a different approach called *truncation by constrained inversion*
3. the simple technique *truncation by acceptance-rejection*

Important points

The modeler should be familiar with

Starter pack di conoscenza

- How these distribution arise
- The support, χ
- The mean, μ
- The variance, σ^2
- The shape of the pdf

- how these distributions relate to one another

Exercises

- Generating Discrete RV, use of libraries: exerc. 6.2.4
- Truncation: exerc. 6.3.1, 6.3.2