

# MS-A0509 Grundkurs i sannolikhetskalkyl och statistik

## Exempel, del I

G. Gripenberg

Aalto-universitetet

23 januari 2014

### Dragning med och utan återläggning, forts.

I fallet (!Å) utan återläggning kan vi plocka  $m$  kulor ur en urna med  $k$  kulor på  $\binom{k}{m}$  olika sätt (då vi antar att kulorna är olika men det inte spelar någon roll i vilken ordning vi plockat dem). På samma sätt kan vi plocka  $n$  vita kulor bland alla  $v$  vita på  $\binom{v}{n}$  olika sätt och  $m - n$  svarta bland alla  $s = k - v$  svarta på  $\binom{k-v}{m-n}$  olika sätt.

Enligt produktprincipen kan vi plocka  $n$  vita och  $m - n$  svarta bland alla  $v$  vita och  $k - s$  svarta på  $\binom{v}{n} \cdot \binom{k-v}{m-n}$  olika sätt och sannolikheten blir (enligt den klassiska definitionen)

$$\Pr(X = n) = \frac{\binom{v}{n} \cdot \binom{k-v}{m-n}}{\binom{k}{m}}.$$

Detta är den sk. hypergeometriska fördelningen.

### Dragning med och utan återläggning

Antag att i en urna finns  $k$  kulor av vilka  $v$  vita och resten  $s = k - v$  är svarta. Om man (slumpmässigt) nu plockar  $m$  kulor ur urnan och låter  $X$  vara antalet vita kulor så blir sannolikhetsfördelningen av  $X$  (och resonemanget som leder till svaret) beroende på om på om

(Å) varje kula läggs tillbaka i urnan efter att färgen noterats och före följande plockas, eller

(!Å) ingen kula läggs tillbaka i urnan.

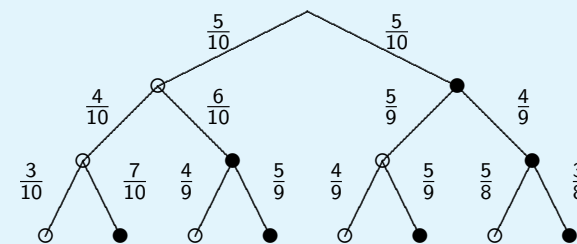
I fallet (Å) med återläggning är sannolikheten att man plockar en vit kula varje gång  $p = \frac{v}{k}$  så vi kan behandla dethär fallet som en upprepning  $m$  gånger av ett experiment. Eftersom det är förnuftigt att anta att händelserna i de olika omgångarna är oberoende blir sannolikheten att vi  $n$  gånger plockar en vit kula

$$\Pr(X = n) = \binom{m}{n} \left(\frac{v}{k}\right)^n \left(1 - \frac{v}{k}\right)^{m-n}.$$

Slumpvariabeln  $X$  är alltså binomial-fördelad med parametrarna  $m$  och  $\frac{v}{k}$ .

### Sannolikhet räknad med hjälp av ett träd nätverk

I en urna finns 5 vita och 5 svarta kulor. Vi plockar slumpmässigt en kula och om den är vit lägger vi en svart kula i urnan och om den är svart lägger vi inte någon kula i urnan. Vi gör detta sammanlagt tre gånger. Om vi nu vill bestämma sannolikheten för den sista kulan vi plockar är svart så kan vi beskriva proceduren med följande träd nätverk:



Sannolikheten för att den sista kulan är svart blir därför

$$\frac{5}{10} \cdot \frac{4}{10} \cdot \frac{7}{10} + \frac{5}{10} \cdot \frac{6}{10} \cdot \frac{5}{9} + \frac{5}{10} \cdot \frac{5}{9} \cdot \frac{5}{9} + \frac{5}{10} \cdot \frac{4}{9} \cdot \frac{3}{8} = \frac{4409}{8100} \approx 0.54.$$

## Bayes formel

I ett kommunikationssystem (med röksignaler?) används binära tal, dvs "nollor" och "ettor" så att 30% av de binära tal som skickas är 0 och 70% är 1. I systemet förekommer störningar så att en del av talen 0 kommer fram som 1 och en del av talen 1 kommer fram som 0. En nolla kommer korrekt fram med sannolikheten 0.8 och en etta med sannolikheten 0.9. Om vi nu vill räkna ut sannolikheten för att "0 har skickats då 0 har mottagits" och "1 har skickats då 1 har mottagits" så kan vi använda Bayes formel och först definiera

$$\begin{aligned} S_0 &= \{ \text{"0 har skickats"} \} & \Pr(S_0) &= 0.3 \\ S_1 &= \{ \text{"1 har skickats"} \} & \Pr(S_1) &= 0.7 \\ M_0 &= \{ \text{"0 har mottagits"} \} & \Pr(M_0|S_0) &= 0.8 \\ M_1 &= \{ \text{"1 har mottagits"} \} & \Pr(M_1|S_1) &= 0.9 \end{aligned}$$

Då får vi

$$\begin{aligned} \Pr(S_1|M_1) &= \frac{\Pr(M_1|S_1)\Pr(S_1)}{\Pr(M_1|S_1)\Pr(S_1) + \Pr(M_1|S_0)\Pr(S_0)} \\ &= \frac{0.9 \cdot 0.7}{0.9 \cdot 0.7 + 0.2 \cdot 0.3} = \frac{0.63}{0.69} \approx 0.913, \end{aligned}$$

## Bayes formel, forts.

och

$$\begin{aligned} \Pr(S_0|M_0) &= \frac{\Pr(M_0|S_0)\Pr(S_0)}{\Pr(M_0|S_0)\Pr(S_0) + \Pr(M_0|S_1)\Pr(S_1)} \\ &= \frac{0.8 \cdot 0.3}{0.8 \cdot 0.3 + 0.1 \cdot 0.7} = \frac{0.24}{0.31} \approx 0.774. \end{aligned}$$

Ett annat sätt att resonera är att 1000 tecken skickats, 300 nollor och 700 ettor. av de 300 nollorna kommer 240 fram som 0 och 60 som 1 och av de 700 ettorna kommer 630 fram som 1 och 70 som 0. Sammanlagt kommer det alltså 310 nollor och 690 ettor av vilka 240 respektive 630 är korrekta. Då blir

$$\Pr(S_1|M_1) = \frac{630}{690} \approx 0.913,$$

och

$$\Pr(S_0|M_0) = \frac{240}{310} \approx 0.774.$$

## Ett samband mellan exponential- och Poissonfördelningen

Antag att  $X_1, X_2, \dots$  är oberoende  $\text{Exp}(\lambda)$  fördelade slumpvariabler och att  $T > 0$ . Låt nu  $Y = \max\{k \geq 0 : X_1 + X_2 + \dots + X_k \leq T\}$ . Vi skall visa att  $Y \sim \text{Poisson}(\lambda T)$ .

Här kan vi använda det resultat som säger att om  $U$  ja  $V$  är oberoende slumpvariabler med täthetsfunktioner  $f$  och  $g$  så har slumpvariabeln  $U + V$  täthetsfunktionen  $\int_{-\infty}^{\infty} f(x-t)g(t)dt$ . Nu gör vi induktionsantagandet att slumpvariabeln  $X_1 + X_2 + \dots + X_n$  har täthetsfunktionen  $\frac{\lambda^n e^{-\lambda x} x^{n-1}}{(n-1)!}$  då  $x \geq 0$  och 0 då  $x < 0$ . Detta är fallet åtminstone då  $n = 1$ . Då kommer slumpvariabeln  $X_1 + X_2 + \dots + X_{n+1}$  att ha täthetsfunktionen

$$\begin{aligned} \int_0^x \lambda e^{-\lambda(x-t)} \frac{\lambda^n e^{-\lambda t} t^{n-1}}{(n-1)!} dt &= \lambda^{n+1} e^{-\lambda x} \int_0^x \frac{1}{(n-1)!} t^{n-1} dt \\ &= \lambda^{n+1} e^{-\lambda x} \int_0^x \frac{1}{n!} t^n = \frac{\lambda^{n+1} e^{-\lambda x} x^n}{n!}, \end{aligned}$$

så induktionssteget fungerar.

## Ett samband mellan exponential- och Poissonfördelningen, forts.

Antag nu att  $k \geq 1$ . Om

$$\begin{aligned} A &= \{X_1 + \dots + X_k \leq T\}, \\ B &= \{X_1 + \dots + X_k + X_{k+1} > T\}, \end{aligned}$$

så skall vi räkna ut  $\Pr(A \cap B)$ . Eftersom  $X_{k+1} \geq 0$  så är  $B^c \subset A$  och  $A = (A \cap B) \cup (A \cap B^c) = (A \cap B) \cup B^c$  av vilket följer att  $\Pr(A) = \Pr(A \cap B) + \Pr(B^c)$  så att

$$\begin{aligned} \Pr(A \cap B) &= \Pr(A) - \Pr(B^c) = \Pr(B) - \Pr(A^c) \\ &= \int_T^{\infty} \frac{\lambda^{k+1} e^{-\lambda x} x^k}{k!} dx - \int_T^{\infty} \frac{\lambda^k e^{-\lambda x} x^{k-1}}{(k-1)!} dx = - \int_T^{\infty} \frac{\lambda^k e^{-\lambda x} x^k}{k!} \\ &\quad + \int_T^{\infty} \frac{\lambda^k e^{-\lambda x} x^{k-1}}{(k-1)!} dx - \int_T^{\infty} \frac{\lambda^k e^{-\lambda x} x^{k-1}}{(k-1)!} dx = \frac{e^{-\lambda T} (\lambda T)^k}{k!}. \end{aligned}$$

Då  $k = 0$  så följer påståendet av att  $\Pr(X_1 > T) = e^{-\lambda T} = \frac{e^{-\lambda T} (\lambda T)^0}{0!}$ .

## Normalapproximering

Antag att slumpvariabeln  $X$  har fördelningen  $\text{Bin}(1000, 0.25)$ . Nu är  $\Pr(X \geq 300) = \sum_{j=300}^{1000} \binom{1000}{j} 0.25^j 0.75^{1000-j} = 1 - F_{\text{Bin}(1000, 0.25)}(299)$  vilket man lätt kan räkna ut med en dator med lämplig programvara. Men i annat fall kan man utnyttja det faktum att en binomial-fördelad slumpvariabel är summan av oberoende Bernoulli-fördelade slumpvariabler så att vi kan tillämpa centrala gränsvärdesatsen och får, eftersom  $X$  har väntevärdet  $0.25 \cdot 1000 = 250$  och variansen  $1000 \cdot 0.25 \cdot 0.75 = 187.5$ . Detta betyder att (då  $Z \sim N(0, 1)$ )

$$\begin{aligned} \Pr(X \geq 300) &= 1 - \Pr(X \leq 299) = 1 - \Pr\left(\frac{X - 250}{\sqrt{187.5}} \leq \frac{299 - 250}{\sqrt{187.5}}\right) \\ &= 1 - \Pr\left(\frac{X - 250}{\sqrt{187.5}} \leq 3.5785\right) \approx 1 - \Pr(Z \leq 3.5785) \approx 0.00017. \end{aligned}$$

Om man räknar med binomialfördelningens fördelningsfunktion blir svaret ungefär 0.00019

## Marginal- och betingadefördelningar

Antag att den tvådimensionella slumpvariabeln  $(X, Y)$  har en diskret fördelning enligt följande tabell där marginalfördelningarna också är uträknade:

$f_{XY}(x, z)$		Y				$f_X(x)$
		1	3	5	7	
X	0	$\frac{1}{16}$	0	$\frac{1}{16}$	0	$\frac{2}{16}$
	2	$\frac{2}{16}$	$\frac{1}{16}$	0	$\frac{1}{16}$	$\frac{4}{16}$
	4	$\frac{1}{16}$	0	$\frac{1}{16}$	0	$\frac{2}{16}$
	6	$\frac{2}{16}$	$\frac{2}{16}$	$\frac{2}{16}$	$\frac{2}{16}$	$\frac{8}{16}$
$f_Y(y)$		$\frac{6}{16}$	$\frac{3}{16}$	$\frac{4}{16}$	$\frac{3}{16}$	1

Den betingade fördelningen av  $X$  givet  $Y = 3$  är

## Marginal- och betingadefördelningar, forts.

X	0	2	4	6
$f_{X Y}(x 3)$	0	$\frac{1}{3}$	0	$\frac{2}{3}$

Av detta ser vi att  $E(X|Y = 3) = 2 \cdot \frac{1}{3} + 6 \cdot \frac{2}{3} = \frac{14}{3}$  och på motsvarande sätt kan vi räkna ut fördelningen för  $E(X|Y)$  som blir

y	1	3	5	7
$E(X Y = y)$	$\frac{10}{3}$	$\frac{14}{3}$	4	$\frac{14}{3}$

$E(X|Y)$  är alltså en slumpvariabel med en frekvensfunktion  $f$  så att  $f(\frac{10}{3}) = \frac{6}{16}$ ,  $f(\frac{14}{3}) = \frac{6}{16}$  och  $f(4) = \frac{4}{16}$ . Av detta ser vi tex. att  $E(E(X|Y)) = \frac{10}{3} \cdot \frac{6}{16} + \frac{14}{3} \cdot \frac{6}{16} + 4 \cdot \frac{4}{16} = 4$  vilket är detsamma som  $E(X) = 0 \cdot \frac{2}{16} + 2 \cdot \frac{4}{16} + 4 \cdot \frac{2}{16} + 6 \cdot \frac{8}{16} = \frac{64}{16} = 4$ .