

Zusammenfassung Markovketten

© Tim Baumann, <http://timbaumann.info/uni-spicker>

Abzählbare Markovketten

Notation. Sei im Folgenden $\{Z_n\}$ eine Markovkette auf einem abzählbaren Zustandsraum E .

Def. Für $x \in E$ und $n \in \mathbb{N}$ definiere die ZV $\tau_x^{(n)}$ induktiv durch

$$\begin{aligned}\tau_x^{(1)} &:= \inf \{n > 0 \mid Z_n = x\} \in \mathbb{N} \cup \{\infty\} \\ \tau_x^{(k)} &:= \inf \{n > \tau_x^{(k-1)} \mid Z_n = x\}, \quad k > 1.\end{aligned}$$

(Beachte: $\tau_x^{(k)}$ ist eine messbare Abbildung.)

Bem. Ferner gilt $\{\tau_x^{(k)} = n\} \in \sigma(Z_0, Z_1, \dots, Z_n)$.

Def. Für $x, y \in E$ sei $F(x, y) := P(\tau_y^{(1)} < \infty \mid Z_0 = x)$

Lem. Für alle $x, y \in E$ und $k \geq 1$ gilt

$$P(\tau_y^{(k)} < \infty \mid Z_0 = x) = F(x, y) \cdot F(y, y)^{k-1}.$$

Bem. Setze $\tilde{\ell}(y) := \sum_{k=j}^{\infty} \mathbb{1}\{Z_k = y\}$. Dann gilt

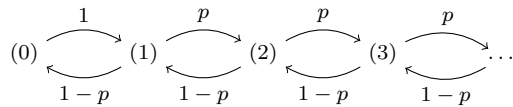
$$P(\tau_y^{(k)} < \infty \mid Z_0 = x) = P(\tilde{\ell} \geq k \mid Z_0 = x).$$

Def. Ein Zustand $x \in E$ heißt

- **absorbierend**, falls $p(x, x) = 1$,
- **rekurrent**, falls $F(x, x) = 1$ und
- **transient**, falls $F(x, x) < 1$.

Bem. Absorbierende Zustände sind rekurrent.

Bsp. In der Markovkette



ist (0) genau dann rekurrent, falls $p \leq 1/2$, ansonsten transient.
TODO: genauer!

Def. Die **Anzahl der Besuche** in $y \in E$ ist

$$\ell(y) := \sum_{k=0}^{\infty} \mathbb{1}\{Z_k = y\}.$$

Die **Green'sche Funktion** von $\{Z_n\}$ ist $G : E \times E \rightarrow [0, \infty]$ mit

$$G(x, y) := \mathbb{E}(\ell(y) \mid Z_0 = x).$$

$$\begin{aligned}\text{Bem. } G(x, y) &= \mathbb{E}(\sum_{k=0}^{\infty} \mathbb{1}\{Z_k = y\} \mid Z_0 = x) \\ &= \sum_{k=0}^{\infty} P(Z_k = y \mid Z_0 = x) \\ &= \delta_{xy} + \sum_{k=1}^{\infty} p^{(k)}(x, y).\end{aligned}$$

Satz. Für alle $x, y \in E$ gilt

$$G(x, y) = \begin{cases} F(x, y)/(1 - F(y, y)) & \text{falls } x \neq y, \\ 1/(1 - F(y, y)) & \text{falls } x = y. \end{cases}$$

Kor. x ist rekurrent $\iff G(x, x) = \infty$

Satz. Ist $x \in E$ rekurrent und $F(x, y) > 0$, so ist y auch rekurrent und $F(x, y) = F(y, x) = 1$.

Bem. $F(x, y) > 0 \iff \exists n \geq 1 : p^{(n)}(x, y) > 0$

Def. $\{Z_n\}$ heißt **irreduzibel**, falls $\forall x, y \in E : F(x, y) > 0$.

Satz. Sei $\{Z_n\}$ irreduzibel. Dann sind entweder alle Zustände rekurrent oder alle Zustände transient.

Satz. Irreduzible Ketten auf endlichen Räumen sind rekurrent.

Rekurrenz und Transienz von Irrfahrten

Situation. $\{Z_n\}$ ist eine Irrfahrt auf \mathbb{Z}^d , d. h.

$$p(x, y) = p(0, y - x) =: q(y - x).$$

Mit and. Worten: Die *Zuwächse* $\{Z_n - Z_{n-1}\}_{n \geq 1}$ sind i. i. d. ZVn.

Bsp. Einfache Irrfahrt auf \mathbb{Z} : $p(0, 1) = p, p(0, -1) = q = 1 - p$

In diesem Fall kann man die Greensche Funktion exakt berechnen:

$$\begin{aligned}G(x, x) &= G(0, 0) \\ &= \sum_{m=0}^{\infty} p^{(m)}(0, 0) \\ &= 1 + \sum_{n=1}^{\infty} p^{(2n)}(0, 0) \\ &= 1 + \sum_{n=1}^{\infty} \binom{2n}{n} p^n (1-p)^n \\ &= 1 + \sum_{n=1}^{\infty} \binom{2n}{n} 4^{-n} (4p(1-p))^n \\ &= (1 - 4p(1-p))^{-1/2} \\ &= 1/(2p-1)\end{aligned}$$

Satz. Sei $\{Z_n\}$ eine Irrfahrt auf \mathbb{Z} mit

$$\mathbb{E}|Z_1 - Z_0| = \sum_{x \in \mathbb{Z}} |x| p(0, x) < \infty.$$

Dann gilt: $\{Z_n\}$ ist rekurrent $\iff \sum_{x \in \mathbb{Z}} x p(0, x) = 0$.

Def. Die **einfache symmetrische Irrfahrt auf \mathbb{Z}^d** ist die translationsinvariante Markovkette mit

$$p(0, \pm e_i) = \frac{1}{2d} \quad \text{für } i = 1, \dots, d.$$

Bem. Für einfache symmetrische Irrfahrten gilt:

$$p^{(2n)}(x, x) = \sum_{\substack{k_1, \dots, k_d \in \mathbb{N} \\ k_1 + \dots + k_d = n}} \frac{(2n)!}{(k_1!)^2 \dots (k_d!)^2} \left(\frac{1}{2d}\right)^{2n}$$

Für $d = 2$ gilt $p^{(2n)}(0, 0) = \left[\binom{2n}{n} \left(\frac{1}{2}\right)^{2n}\right]^2$. Mit der Stirling'schen Formel folgt $p^{(2n)}(0, 0) \approx \frac{1}{\pi n}$. Somit gilt $\sum p^{(2n)}(0, 0) = \infty$.

Fazit. Die zweidimensionale einfache symm. Irrfahrt ist rekurrent.

Bem. Man kann zeigen: Für einfache symm. Irrfahrten auf \mathbb{Z}^d gilt

$$p^{(2n)}(0, 0) \leq C_d / n^{d/2}$$

für eine Konstante $C_d > 0$. Somit ist die einfache Irrfahrt transient für alle $d \geq 3$.

Def. $\varphi(t) := \sum_{x \in \mathbb{Z}^d} e^{i(t \cdot x)} p(0, x) \quad \text{für } t \in \mathbb{R}^d$

Bem. Da die Zuwächse $\{Z_n - Z_{n-1}\}$ i. i. d. sind, gilt

$$\sum_{x \in \mathbb{Z}^d} e^{i(t \cdot x)} p^{(n)}(0, x) = \varphi^n(t), \quad n \geq 1$$

$$\text{Inversionsformel: } p^{(n)}(0, x) = \frac{1}{(2\pi)^d} \int_{[-\pi, \pi]^d} e^{-i(t \cdot x)} \varphi^n(t) dt$$

Satz. Für jede Irrfahrt $\{Z_n\}$ auf \mathbb{Z}^d gilt

$$G(0, 0) = \left(\frac{1}{2\pi}\right)^d \lim_{\lambda \uparrow 1} \int_{t \in [-\pi, \pi]^d} Re\left(\frac{1}{1 - \lambda \varphi(t)}\right) dt = \infty$$

Bsp. Für die einfache symm. Irrfahrt $\{Z_n\}$ auf \mathbb{Z}^d ist

$$\varphi(t) = \frac{1}{d} \sum_{k=1}^d \cos(t_k)$$

Mit der Ungleichung $1 - \cos(u) \geq c_0 u^2$ für alle $u \in [-\pi, \pi]$ folgt

$$\varphi(t) \geq \frac{c_0}{d} |t|^2.$$

Es folgt

$$\frac{1}{1 - \lambda \varphi(t)} \leq \frac{d}{\lambda c_0} |t|^{-2}$$

Die Funktion $|t|^{-2}$ ist auf $[-\pi, \pi]^d$ für jedes $d \geq 3$ integrierbar. Somit ist die einfache Irrfahrt auf \mathbb{Z}^d , $d \geq 3$, transient.

Satz. Jede irreduzible Irrfahrt auf \mathbb{Z}^d mit $d \geq 3$ ist transient.

Bsp. Sei $\{Z_n\}$ eine Irrfahrt auf \mathbb{Z} mit $p(0, x) = p(0, -x)$. Gelte

$$x^\alpha p(0, x) \xrightarrow{x \rightarrow \infty} c \in (0, \infty)$$

für ein $\alpha > 1$. Dann ist

$$1 - \varphi(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} (1 - \cos(nt)) p(0, n) \quad \text{und} \quad \frac{1 - \varphi(t)}{|t|^{\alpha-1}} = \sum_{n=-\infty}^{\infty} |n|^\alpha p(0, n) |t| f(nt)$$

mit $f(x) = (1 - \cos(x))/|x|^\alpha$. Außerdem $|n|^\alpha p(0, n) = c + \epsilon_n$, wobei $\epsilon_n \rightarrow 0$ für $|n| \rightarrow \infty$. Es folgt

$$\frac{1 - \varphi(t)}{|t|^{\alpha-1}} = \sum_{n=-\infty}^{\infty} c |t| f(nt) + \sum_{n=-\infty}^{\infty} \epsilon_n |t| f(nt).$$

Für $t \rightarrow 0$ hat man

$$\sum_{n=-\infty}^{\infty} |t| f(nt) \rightarrow \int_{-\infty}^{\infty} f(x) dx \quad \text{und} \quad \sum_{n=-\infty}^{\infty} \epsilon_n |t| f(nt) \rightarrow 0.$$

Es folgt für $\alpha < 3$:

$$\lim_{t \rightarrow 0} \frac{1 - \varphi(t)}{|t|^{\alpha-1}} = c \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1 - \cos(x)}{|x|^\alpha} dx < \infty$$

Folglich ist $\frac{1}{1 - \varphi(t)}$ für $\alpha < 2$ integrierbar und somit $\{Z_n\}$ transient. Für $\alpha = 2$ ist $1/(1 - \varphi(t))$ in der Umgebung von null nicht integrierbar und damit $\{Z_n\}$ rekurrent. Für $\alpha > 2$ ist $\sum |x| p(0, x) < \infty$ und somit ist die Irrfahrt rekurrent, da der Erwartungswert der Zuwächse null ist.

Erneuerungstheorie

Situation. Seien $\{X_k\}_{k\geq 1}$ unabhängige ZVn mit Werten in \mathbb{N} und $P(X_k \geq 1) > 0$, wobei $\{X_k\}_{k\geq 2}$ identisch vert. sind. Dann definiert

$$Z_n := \sum_{k=1}^n X_k + Z_0$$

eine Irrfahrt $\{Z_n\}_{n\geq 0}$ mit nicht-negativen Zuwächsen auf \mathbb{Z} .

Ziel. Untersuche das asympt. Verhalten von $G(0, x)$.

Def. Die **erzeugende Funktion** einer Folge $\{a_n\}$ ist

$$A(s) := \sum_{n=0}^\infty a_n s^n.$$

Bsp. Setze $p_k := P(X_2 = k)$, $k \geq 0$. Wir nehmen an, dass

$$a := \mathbb{E}[X_2] = \sum_{k=1}^\infty k p_k \in (0, \infty).$$

Definiere $q_k := \frac{1}{a} \sum_{j=k}^\infty p_j$ für $k \geq 1$. Dann ist $\sum_{k=1}^\infty q_k = 1$. Sei X_1 eine ZV mit $P(X_1 = k) = q_k$, $k \geq 1$. Setze

$$\begin{aligned} f(s) &:= \sum_{k=1}^\infty p_k s^k = \mathbb{E}[s^{X_2}], \quad |s| \leq 1 \\ g(s) &:= \sum_{k=1}^\infty q_k s^k = \mathbb{E}[s^{X_1}] \\ \psi(s) &:= \sum_{x=1}^\infty G(0, x) s^x, \quad |s| < 1 \end{aligned}$$

Dann gilt für $|s| < 1$:

$$\psi(s) = \sum_{k=1}^\infty g(s) f(s)^{k-1} = g(s)/(1 - f(s))$$

Außerdem gilt:

$$g(s) = \frac{s}{a(1-s)} (1 - f(s))$$

Es folgt:

$$\psi(s) = \sum_{x=1}^\infty \frac{1}{a} s^x$$

Somit ist $G(0, x) = \frac{1}{a}$.

Satz. Angenommen, $\text{ggT}\{k \mid p_k > 0\} = 1$. Dann gilt für jede Verteilung von X_1 , dass

$$G(0, x) \xrightarrow{x \rightarrow \infty} \frac{1}{a}.$$

Lem. Sei $g(\theta)$ integrierbar auf $[-\pi, \pi)$. Dann gilt

$$\int_{[-\pi, \pi)} e^{i\theta x} g(\theta) d\theta \xrightarrow{|x| \rightarrow \infty} 0 \quad (x \in \mathbb{Z})$$

Lem. Seien alle X_k identisch verteilt und $\text{ggT}\{p \mid p_k > 0\} = 1$. Dann existiert $L := \lim_{x \rightarrow \infty} G(0, x)$.

Def. Seien $\{X_k\}_{k\geq 1}$ unabhängige, nichtneg. ZVn und seien $\{X_k\}_{k\geq 2}$ identisch verteilt. Setze $Z_n := \sum_{k=1}^n X_k$. Dann heißt

$$\begin{aligned} \eta(t) &:= \min\{k \geq 1 \mid Z_k > t\} && \text{Erneuerungsprozess und} \\ H(t) &:= \mathbb{E}[\eta(t)] && \text{Erneuerungsfunktion.} \end{aligned}$$

Falls X_k nur Werte aus \mathbb{N} annimmt, so können wir das Verhalten von $H(t) - H(t - 1)$ wie folgt beschreiben:

$$\begin{aligned} H(t) &= \mathbb{E}[\eta(t)] = \sum_{k=0}^\infty P(\eta(t) > k) = \sum_{k=0}^\infty P(Z_k \leq t) \\ \rightsquigarrow H(t) - H(t - 1) &= \sum_{k=0}^\infty P(Z_k = t) \xrightarrow{t \rightarrow \infty} 1/\mathbb{E}[X_2]. \end{aligned}$$

Def. $\gamma(t) := t - Z_{\eta(t)-1} \geq 0$ heißt **Overshoot**,
 $\chi(t) := Z_{\eta(t)} - t > 0$ heißt **Undershoot**.

Satz. Sind die Bedingungen des letzten Satzes erfüllt, so gilt

$$P(\gamma(t) = i, \chi(t) = j) \xrightarrow{t \rightarrow \infty} \frac{p_{i+j}}{\mathbb{E}[X_2]} \quad \text{für alle } i \geq 0, j \geq 1.$$

Kor.
$$\begin{aligned} P(\gamma(t) = i) &\xrightarrow{t \rightarrow \infty} \frac{1}{a} \sum_{k=i+1}^\infty p_k, \\ P(\gamma(t) = j) &\xrightarrow{t \rightarrow \infty} \frac{1}{a} \sum_{k=j}^\infty p_k \end{aligned}$$

TODO: Eine der Gleichungen im Korollar sollte χ beinhalten.

Positive Rekurrenz

Def. $x \in E$ heißt **positiv rekurrent**, falls $\mathbb{E}[\tau_x^{(1)} \mid Z_0 = x] < \infty$

Bem. positive Rekurrenz \implies Rekurrenz

Def. Falls x rekurrent, aber nicht positiv rekurrent ist, so heißt x **nullrekurrent**.

Lem. Sei x ein positiv rekurrenter Zustand.
Ist $F(x, y) > 0$ so ist auch y positiv rekurrent.

Kor. Ist $\{Z_n\}$ irreduzibel und $x_0 \in E$ positiv rekurrent, so gilt:

- alle Zustände sind positiv rekurrent
- $m(x, y) := \mathbb{E}[\tau_y^{(1)} \mid Z_0 = x] < \infty$ für alle $x, y \in E$

Def. Die Zahl $d_x := \text{ggT}\{n \geq 1 \mid p^{(n)}(x, x) > 0\}$ heißt **Periode** von x . Falls $d = d_x$ für alle $x \in E$, so heißt d *Periode* der Kette $\{Z_n\}$.

Lem. Ist $\{Z_n\}$ irreduzibel, so gilt $d_x = d_y$ für alle $x, y \in E$.

Satz. Es gibt eine Familie $\{\pi_y \in \mathbb{R}_{>0}\}_{y \in E}$, sodass

$$\forall x, y \in E : p^{(n)}(x, y) \xrightarrow{n \rightarrow \infty} \pi_y$$

genau dann, wenn

- $\{Z_n\}$ irreduzibel und
- aperiodisch (d. h. $d = 1$) ist und
- ein x_0 existiert, sodass $m(x_0, x_0) < \infty$.

Die Folge $\{\pi_y\}_{y \in E}$ ist die eindeutige Lösung zu

$$\begin{cases} \sum_{y \in E} |P_y| < \infty \\ \sum_{y \in E} \pi_y = 1 \\ \sum_{x \in E} \pi_x p(x, y) = \pi_y \text{ für alle } y \in E \end{cases}$$

Es gilt $\pi_y = 1/m(y, y)$.