

離散数理工学 第 14 回  
離散確率論：マルコフ連鎖 (発展)

岡本 吉央  
okamotoy@uec.ac.jp

電気通信大学

2016 年 2 月 2 日

最終更新：2016 年 2 月 1 日 14:08

岡本 吉央 (電通大)

離散数理工学 (14)

2016 年 2 月 2 日

1 / 38

スケジュール 後半 (予定)

- 9 離散確率論：確率の復習と確率不等式 (12/15)
- ★ 中間試験 (12/22)
- 10 離散確率論：確率的離散システムの解析 (1/5)
- 11 離散確率論：乱択データ構造とアルゴリズム (基礎) (1/12)
- 12 離散確率論：乱択データ構造とアルゴリズム (発展) (1/19)
- 13 離散確率論：マルコフ連鎖 (基礎) (1/26)
- 14 離散確率論：マルコフ連鎖 (発展) (2/2)
- ★ 予備日 (2/9)
- ★ 期末試験 (2/16)

注意：予定の変更もありうる

岡本 吉央 (電通大)

離散数理工学 (14)

2016 年 2 月 2 日

3 / 38

今日の目標

今日の目標

マルコフ連鎖について以下ができるようになる

- ▶ 「ギャンブラーの破産」において、破産確率を計算できる
- ▶ 「有限グラフ上のランダムウォーク」において、到達時刻 (の期待値) を計算できる

この講義で扱うマルコフ連鎖は

「斉時 離散時間 有限状態 マルコフ連鎖」と呼ばれるもの

岡本 吉央 (電通大)

離散数理工学 (14)

2016 年 2 月 2 日

5 / 38

マルコフ連鎖：例 — 推移行列

見にくいので、行列で表現する

$$P = \begin{matrix} & \begin{matrix} F & C & R \end{matrix} \\ \begin{matrix} F \\ C \\ R \end{matrix} & \begin{pmatrix} 1/2 & 1/3 & 1/6 \\ 1/3 & 1/3 & 1/3 \\ 1/4 & 1/2 & 1/4 \end{pmatrix} \end{matrix}$$

「行」から「列」へ推移する

岡本 吉央 (電通大)

離散数理工学 (14)

2016 年 2 月 2 日

7 / 38

- 1 数え上げの基礎：二項係数と二項定理 (10/6)
- ★ 休講 (体育祭) (10/13)
- 2 数え上げの基礎：漸化式の立て方 (10/20)
- 3 数え上げの基礎：漸化式の解き方 (基礎) (10/27)
- ★ 祝日で休み (11/3)
- 4 数え上げの基礎：漸化式の解き方 (発展) (11/10)
- 5 離散代数：整数と有限体 (11/17)
- 6 離散代数：多項式環 (11/24)
- 7 離散代数：多項式環による有限体の構成 (12/1)
- 8 離散代数：有限体の応用 (12/8)

岡本 吉央 (電通大)

離散数理工学 (14)

2016 年 2 月 2 日

2 / 38

期末試験

- ▶ 日時、場所
  - ▶ 2月16日(火)：1限 @西9-115 (遅刻しないように)
- ▶ 出題範囲
  - ▶ 第9回から第14回(今回)まで
- ▶ 出題形式
  - ▶ 演習問題と同じ形式の問題を4題出題する
  - ▶ その中の2題は演習問題として提示されたものと同一である (複数の演習問題が組み合わせられて1題とされる可能性もある) (「発展」として提示された演習問題は出題されない)
  - ▶ 全問に解答する
- ▶ 配点：1題15点満点、計60点満点
- ▶ 時間：90分
- ▶ 持ち込み：A4用紙1枚分(裏表自筆書き込み)のみ可

岡本 吉央 (電通大)

離散数理工学 (14)

2016 年 2 月 2 日

4 / 38

マルコフ連鎖：例

次の状況を考える

- ▶ ある街の天気は「晴れ (F)」、「曇り (C)」、「雨 (R)」のいずれか
- ▶ 天気は毎日、確率的に変わる
  - ▶ 晴れの日の翌日の天気が晴れである確率 = 1/2
  - ▶ 晴れの日の翌日の天気が曇りである確率 = 1/3
  - ▶ 晴れの日の翌日の天気が雨である確率 = 1/6
  - ▶ 曇りの日の翌日の天気が晴れである確率 = 1/3
  - ▶ 曇りの日の翌日の天気が曇りである確率 = 1/3
  - ▶ 曇りの日の翌日の天気が雨である確率 = 1/3
  - ▶ 雨の日の翌日の天気が晴れである確率 = 1/4
  - ▶ 雨の日の翌日の天気が曇りである確率 = 1/2
  - ▶ 雨の日の翌日の天気が雨である確率 = 1/4

ポイント

次の日の天気 (に関する確率) は、前の日の天気だけから決まる

岡本 吉央 (電通大)

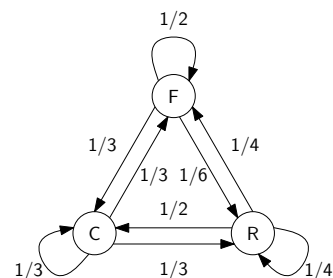
離散数理工学 (14)

2016 年 2 月 2 日

6 / 38

マルコフ連鎖：例 — 状態遷移図

見にくいので、状態遷移図で表現する



「始点」から「終点」へ推移する

岡本 吉央 (電通大)

離散数理工学 (14)

2016 年 2 月 2 日

8 / 38

- ① ギャンブラーの破産
- ② 有限グラフ上のランダムウォーク
- ③ 今日のまとめ

設定

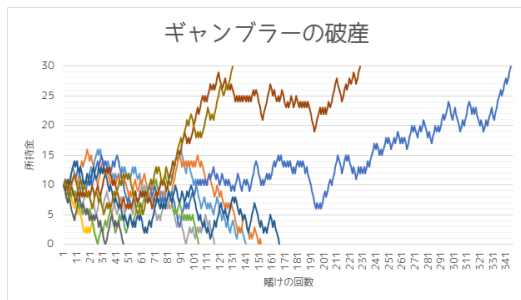
- ▶ 1人のギャンブラー，所持金  $n$  万円
- ▶ 賭けを行うごとに，
  - ▶  $1/2$  の確率で，所持金が 1 万円増加
  - ▶  $1/2$  の確率で，所持金が 1 万円減少
- ▶ 所持金が  $3n$  万円か  $0$  万円になったら，終了

問題

- ① 最終的に， $0$  万円になって終了する確率は？ (破産確率)
- ② 終了するまでに賭けを行う回数 (の期待値) は？

ギャンブラーの破産：とりあえず，シミュレーション

$n = 10$  の場合



10 回の試行中，破産は 7 回

ギャンブラーの破産：興味の対象

問題

- ① 最終的に， $0$  万円になって終了する確率は？
- ② 終了するまでに賭けを行う回数 (の期待値) は？

興味の対象

- ①  $p_n = \Pr(\exists t \geq 0: X_t = 0 \mid X_0 = n)$  (確率)
- ②  $T_n = E[\min\{t \mid X_t \in \{0, 3n\}\} \mid X_0 = n]$  (確率変数の期待値)

最終的に  $0$  万円になって終了する確率：漸化式を解く (1)

$$\begin{aligned}
 p_0 &= 1, \\
 p_k &= \frac{1}{2}p_{k-1} + \frac{1}{2}p_{k+1} \quad (1 \leq k \leq 3n-1 \text{ のとき}), \\
 p_{3n} &= 0
 \end{aligned}$$

▶ つまり， $1 \leq k \leq 3n-1$  のとき

$$p_{k+1} - p_k = p_k - p_{k-1}$$

▶  $q_k = p_{k+1} - p_k$  と置くと

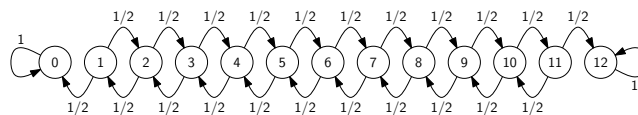
$$\begin{aligned}
 q_0 &= p_1 - p_0 = p_1 - 1, \\
 q_k &= q_{k-1} \quad (1 \leq k \leq 3n-1 \text{ のとき})
 \end{aligned}$$

▶ つまり， $p_1 - 1 = q_0 = q_1 = \dots = q_{3n-1}$  なので，… (次のページへ続く)

ギャンブラーの破産：マルコフ連鎖としてのモデル化

- ▶ 状態空間は  $\{0, 1, \dots, n, \dots, 3n\}$
- ▶  $X_t = t$  回目の賭けをした後の所持金 (単位：万円) (確率変数)

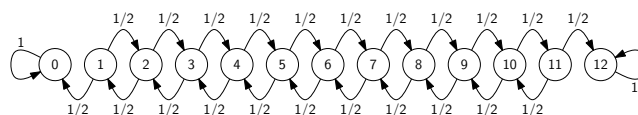
状態遷移図： $n = 4$  のとき



最終的に  $0$  万円になって終了する確率：漸化式

$p_k =$  所持金が  $k$  万円であるとき， $0$  万円で終了する確率

$$p_k = \Pr(\exists t \geq 0: X_t = 0 \mid X_0 = k)$$



▶ このとき，次の漸化式が得られる

$$\begin{aligned}
 p_0 &= 1, \\
 p_k &= \frac{1}{2}p_{k-1} + \frac{1}{2}p_{k+1} \quad (1 \leq k \leq 3n-1 \text{ のとき}), \\
 p_{3n} &= 0
 \end{aligned}$$

最終的に  $0$  万円になって終了する確率：漸化式を解く (2)

▶ つまり， $p_1 - 1 = q_0 = q_1 = \dots = q_{3n-1}$  なので

$$\begin{aligned}
 p_1 &= p_0 + (p_1 - p_0) = 1 + q_0, \\
 p_2 &= p_0 + (p_1 - p_0) + (p_2 - p_1) = 1 + q_0 + q_1 = 1 + 2q_0, \\
 &\vdots
 \end{aligned}$$

$$p_k = p_0 + \sum_{i=0}^{k-1} (p_{i+1} - p_i) = 1 + \sum_{i=0}^{k-1} q_i = 1 + kq_0,$$

$$0 = p_{3n} = 1 + 3nq_0$$

▶ したがって， $q_0 = -\frac{1}{3n}$

▶ したがって， $p_k = 1 - \frac{k}{3n}$ ，特に， $p_n = 1 - \frac{n}{3n} = \frac{2}{3}$

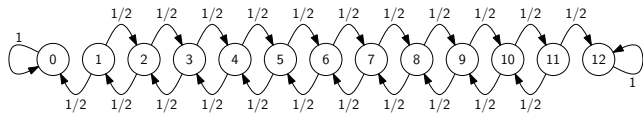
興味の対象

$$T_n = E[\min\{t \mid X_t \in \{0, 3n\}\} \mid X_0 = n] \text{ (確率変数の期待値)}$$

- ▶ 次の期待値を考える

$$T_{n,k} = E[\min\{t \mid X_t \in \{0, 3n\}\} \mid X_0 = k]$$

- ▶ このとき,  $T_{n,0} = T_{n,3n} = 0$  が成り立つ



- ▶ また, 直感的には,  $1 \leq k \leq 3n-1$  のとき, 次が成り立つ?

$$T_{n,k} = 1 + \frac{1}{2}T_{n,k-1} + \frac{1}{2}T_{n,k+1}$$

解くべき漸化式

$$T_{n,k} = \begin{cases} 0 & (k \in \{0, 3n\} \text{ のとき}) \\ 1 + \frac{1}{2}T_{n,k+1} + \frac{1}{2}T_{n,k-1} & (1 \leq k \leq 3n-1 \text{ のとき}) \end{cases}$$

最終的に知りたいのは,  $T_{n,n}$

- ▶  $1 \leq k \leq 3n-1$  のとき,

$$T_{n,k+1} - T_{n,k} = T_{n,k} - T_{n,k-1} - 2$$

- ▶  $U_k = T_{n,k+1} - T_{n,k}$  と置くと,

$$1 \leq k \leq 3n-1 \text{ のとき, } U_k = U_{k-1} - 2$$

$$T_{n,k} = kU_0 - k(k-1) \quad (k \in \{1, 2, \dots, 3n\}),$$

$$0 = T_{n,3n} = 3nU_0 - 3n(3n-1)$$

- ▶ したがって,  $U_0 = 3n-1$
- ▶ したがって,  $k \in \{1, 2, \dots, 3n\}$  のとき,

$$T_{n,k} = k(3n-1) - k(k-1) = k(3n-k)$$

- ▶  $T_{n,0} = 0$  なので,  $k \in \{0, 1, 2, \dots, 3n\}$  のとき,

$$T_{n,k} = k(3n-1) - k(k-1) = k(3n-k)$$

つまり,  $T_n = T_{n,n} = n(3n-n) = 2n^2$

目次

① ギャンブラーの破産

② 有限グラフ上のランダムウォーク

③ 今日のまとめ

$$\begin{aligned} T_{n,k} &= E[\min\{t \mid X_t \in \{0, 3n\}\} \mid X_0 = k] \\ &= \sum_{h=0}^{3n} E[\min\{t \mid X_t \in \{0, 3n\}\} \mid X_0 = k, X_1 = h] \Pr(X_1 = h \mid X_0 = k) \\ &= E[\min\{t \mid X_t \in \{0, 3n\}\} \mid X_0 = k, X_1 = k+1] \Pr(X_1 = k+1 \mid X_0 = k) + \\ &\quad E[\min\{t \mid X_t \in \{0, 3n\}\} \mid X_0 = k, X_1 = k-1] \Pr(X_1 = k-1 \mid X_0 = k) \\ &= (1 + T_{n,k+1}) \cdot \frac{1}{2} + (1 + T_{n,k-1}) \cdot \frac{1}{2} \\ &= 1 + \frac{1}{2}T_{n,k+1} + \frac{1}{2}T_{n,k-1} \end{aligned}$$

演習問題

任意の自然数値確率変数  $X, Y$  と事象  $A$  に対して,  $\Pr(A) \neq 0$  のとき

$$E[X \mid A] = \sum_{i \in \mathbb{N}} E[X \mid A \text{ かつ } Y = i] \Pr(Y = i \mid A)$$

$$\begin{aligned} T_{n,1} &= T_{n,0} + (T_{n,1} - T_{n,0}) = U_0, \\ T_{n,2} &= T_{n,0} + (T_{n,1} - T_{n,0}) + (T_{n,2} - T_{n,1}) \\ &= U_0 + U_1 = U_0 + U_0 - 2 = 2U_0 - 2, \\ T_{n,3} &= T_{n,0} + (T_{n,1} - T_{n,0}) + (T_{n,2} - T_{n,1}) + (T_{n,3} - T_{n,2}) \\ &= U_0 + U_1 + U_2 = U_0 + U_0 - 2 + U_0 - 4 = 3U_0 - 6, \\ &\vdots \\ T_{n,k} &= T_{n,0} + \sum_{i=0}^{k-1} (T_{n,i+1} - T_{n,i}) = kU_0 - k(k-1), \\ &\vdots \\ 0 = T_{n,3n} &= 3nU_0 - 3n(3n-1) \end{aligned}$$

設定

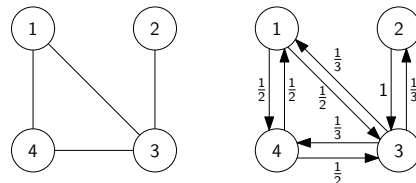
- ▶ 1 人のギャンブラー, 所持金  $n$  万円
- ▶ 賭けを行うごとに,
  - ▶  $1/2$  の確率で, 所持金が 1 万円増加
  - ▶  $1/2$  の確率で, 所持金が 1 万円減少
- ▶ 所持金が  $3n$  万円か  $0$  万円になったら, 終了

問題と解答

- 最終的に,  $0$  万円になって終了する確率は? (破産確率)  
 $\rightsquigarrow \frac{2}{3}$
- 終了するまでに賭けを行う回数 (の期待値) は?  
 $\rightsquigarrow 2n^2$

有限無向グラフ  $G = (V, E)$ :  $V$  は  $G$  の頂点集合,  $E$  は  $G$  の辺集合

- ▶ 時刻  $t = 0, 1, 2, 3, \dots$  に対して, 次のように駒を動かす
  - ▶  $t = 0$  のとき, 駒はある決められた頂点  $u \in V$  に置かれている
  - ▶  $t = k$  のとき, 駒が頂点  $v \in V$  に置かれているとすると,  $t = k+1$  のとき, 駒は  $v$  の隣接頂点へ等確率で動かされる
- ▶ 時刻  $t$  において駒の置かれる頂点を  $X_t$  とすると,  $(X_t \mid t \in \mathbb{N})$  は確率過程



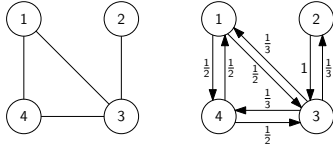
- ▶ この確率過程を  $G$  上の (単純) ランダムウォークと呼ぶ

有限無向グラフ  $G = (V, E)$ 

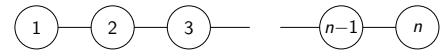
到達時刻とは？

 $G$  上のランダムウォークにおいて、  
頂点  $u \in V$  から頂点  $v \in V$  への到達時刻とは、

$$\tau_{u,v} = \min\{t \geq 0 \mid X_t = v, X_0 = u\}$$



- ▶ この期待値を到達時刻と呼ぶこともある
- ▶ 「 $t \geq 0$ 」ではなく「 $t \geq 1$ 」とする場合もある

次のグラフを考える (頂点数  $n$  の道)左端の頂点を 1, 右端の頂点を  $n$  として,  $E[\tau_{1,n}]$  を計算する

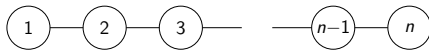
- ▶ グラフの形状から次が分かる

$$\tau_{1,n} = \tau_{1,2} + \tau_{2,3} + \dots + \tau_{n-1,n}$$

- ▶ したがって, 期待値の線形性より

$$E[\tau_{1,n}] = E[\tau_{1,2}] + E[\tau_{2,3}] + \dots + E[\tau_{n-1,n}]$$

- ▶ つまり, 任意の  $i \in \{1, \dots, n-1\}$  に対する  $E[\tau_{i,i+1}]$  が分かればよい



- ▶ まず,  $E[\tau_{1,2}] = 1$
- ▶ 次に,  $i \in \{2, \dots, n-1\}$  のとき,

$$\begin{aligned} E[\tau_{i,i+1}] &= 1 \cdot \frac{1}{2} + (1 + E[\tau_{i-1,i+1}]) \cdot \frac{1}{2} \\ &= 1 + \frac{1}{2}(E[\tau_{i-1,i}] + E[\tau_{i,i+1}]) \\ \therefore E[\tau_{i,i+1}] &= 2 + E[\tau_{i-1,i}] \end{aligned}$$

- ▶ したがって,  $a_i = E[\tau_{i,i+1}]$  と置くと

$$a_i = \begin{cases} 1 & (i = 1 \text{ のとき}), \\ 2 + a_{i-1} & (i \in \{2, \dots, n-1\} \text{ のとき}) \end{cases}$$

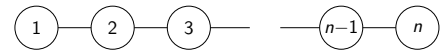
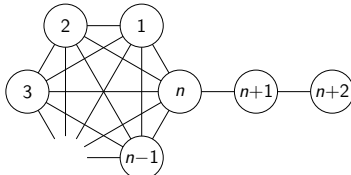
- ▶ これを解くと, 任意の  $i \in \{1, \dots, n-1\}$  に対して,  $a_i = 2i - 1$

証明したこと

任意の  $i \in \{1, \dots, n-1\}$  に対して,  $E[\tau_{i,i+1}] = 2i - 1$ 

以上の考察をまとめると,

$$\begin{aligned} E[\tau_{1,n}] &= E[\tau_{1,2}] + E[\tau_{2,3}] + \dots + E[\tau_{n-1,n}] \\ &= \sum_{i=1}^{n-1} (2i - 1) = (n-1)^2 \end{aligned}$$

次のグラフを考える (頂点数  $n$  の完全グラフに長さ 2 の道を追加) $E[\tau_{1,n+2}]$  を計算する

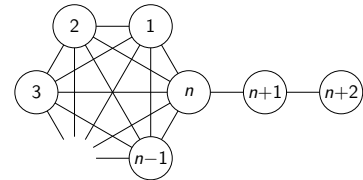
- ▶ グラフの形状から次が分かる

$$\tau_{1,n+2} = \tau_{1,n} + \tau_{n,n+1} + \tau_{n+1,n+2}$$

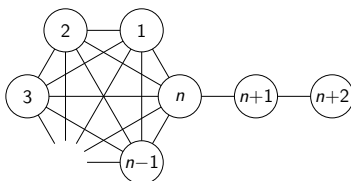
- ▶ したがって, 期待値の線形性から

$$E[\tau_{1,n+2}] = E[\tau_{1,n}] + E[\tau_{n,n+1}] + E[\tau_{n+1,n+2}]$$

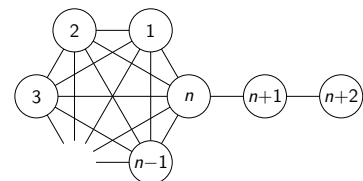
- ▶ つまり,  $E[\tau_{1,n}], E[\tau_{n,n+1}], E[\tau_{n+1,n+2}]$  が分かればよい



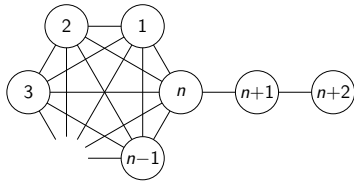
$$\begin{aligned} E[\tau_{1,n}] &= \frac{1}{n-1} \cdot 1 + \frac{n-2}{n-1} (1 + E[\tau_{1,n}]) \\ (n-1)E[\tau_{1,n}] &= n-1 + (n-2)E[\tau_{1,n}] \\ \therefore E[\tau_{1,n}] &= n-1 \end{aligned}$$



$$\begin{aligned} E[\tau_{n,n+1}] &= \frac{1}{n} \cdot 1 + \frac{n-1}{n} (1 + E[\tau_{1,n}] + E[\tau_{n,n+1}]) \\ nE[\tau_{n,n+1}] &= n + (n-1)E[\tau_{1,n}] + (n-1)E[\tau_{n,n+1}] \\ &= n + (n-1)^2 + (n-1)E[\tau_{n,n+1}] \\ \therefore E[\tau_{n,n+1}] &= n + (n-1)^2 = n^2 - n + 1 \end{aligned}$$



$$\begin{aligned} E[\tau_{n+1,n+2}] &= \frac{1}{2} \cdot 1 + \frac{1}{2} (1 + E[\tau_{n,n+1}] + E[\tau_{n+1,n+2}]) \\ 2E[\tau_{n+1,n+2}] &= 2 + E[\tau_{n,n+1}] + E[\tau_{n+1,n+2}] \\ &= 2 + (n^2 - n + 1) + E[\tau_{n+1,n+2}] \\ \therefore E[\tau_{n+1,n+2}] &= 2 + (n^2 - n + 1) = n^2 - n + 3 \end{aligned}$$



したがって、

$$\begin{aligned} E[\tau_{1,n+2}] &= E[\tau_{1,n}] + E[\tau_{n,n+1}] + E[\tau_{n+1,n+2}] \\ &= (n-1) + (n^2 - n + 1) + (n^2 - n + 3) \\ &= 2n^2 - n + 3 \end{aligned}$$

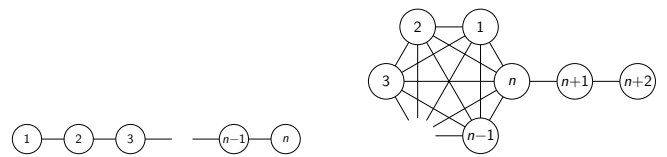
## 目次

## ① ギャンブラーの破産

## ② 有限グラフ上のランダムウォーク

## ③ 今日のまとめ

- ▶ 頂点数  $n+2$  の道：  
到達時刻の期待値  $= (n+1)^2$
- ▶ 頂点数  $n$  の完全グラフ + 長さ 2 の道：  
到達時刻の期待値  $= 2n^2 - n + 3$



教訓：辺を多くすると、到達時刻の期待値が増えることがある

## 今日の目標

## 今日の目標

マルコフ連鎖について以下ができるようになる

- ▶ 「ギャンブラーの破産」において、破産確率を計算できる
- ▶ 「有限グラフ上のランダムウォーク」において、到達時刻 (の期待値) を計算できる

この講義で扱うマルコフ連鎖は

「斉時 離散時間 有限状態 マルコフ連鎖」と呼ばれるもの