

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

- | | | |
|---|----------------------|---------|
| 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) |

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

- ▶ 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じである(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

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

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

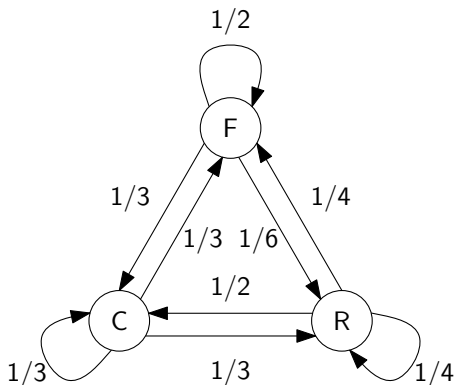
次の日の天気 (に関する確率) は, 前の日の天気だけから決まる

見にくいので，行列で表現する

$$\mathbf{P} = \begin{array}{c} \text{F} \\ \text{C} \\ \text{R} \end{array} \begin{array}{ccc} \text{F} & \text{C} & \text{R} \\ \left(\begin{array}{ccc} 1/2 & 1/3 & 1/6 \\ 1/3 & 1/3 & 1/3 \\ 1/4 & 1/2 & 1/4 \end{array} \right) \end{array}$$

「行」から「列」へ推移する

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

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

ギャンブラーの破産：設定

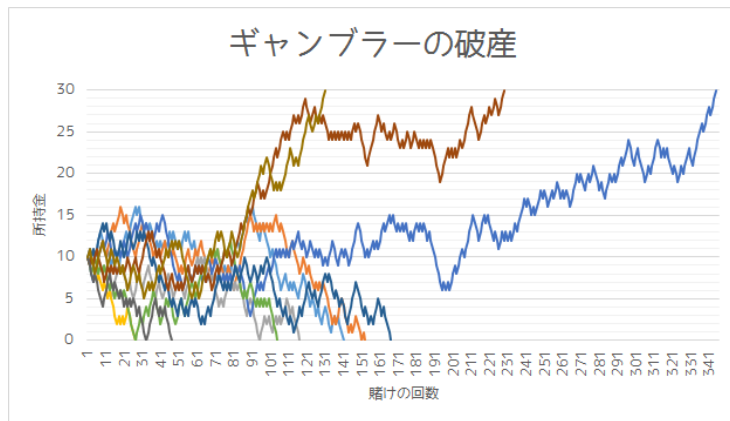
設定

- ▶ 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

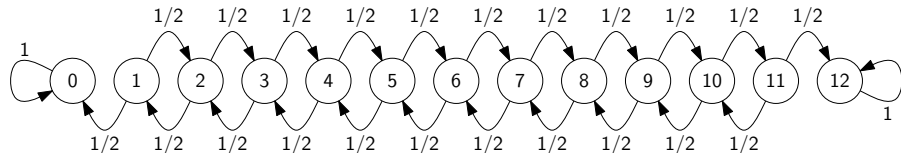
 $n = 10$ の場合

10回の試行中，破産は7回

ギャンブラーの破産：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



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？

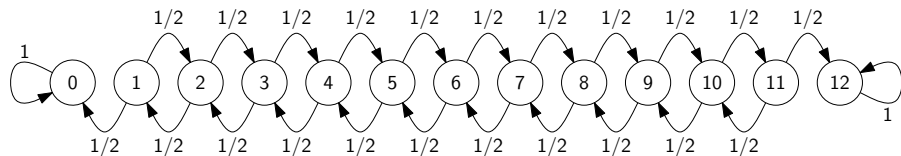
興味の対象

- 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

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 (1)

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

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

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

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

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

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)

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, $p_1 - 1 = q_0 = q_1 = \cdots = q_{3n-1}$ なので

$$p_1 = p_0 + (p_1 - p_0) = 1 + q_0,$$

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, $p_1 - 1 = q_0 = q_1 = \cdots = q_{3n-1}$ なので

$$p_1 = p_0 + (p_1 - p_0) = 1 + q_0,$$

$$p_2 = p_0 + (p_1 - p_0) + (p_2 - p_1) = 1 + q_0 + q_1 = 1 + 2q_0,$$

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, $p_1 - 1 = q_0 = q_1 = \cdots = q_{3n-1}$ なので

$$p_1 = p_0 + (p_1 - p_0) = 1 + q_0,$$

$$p_2 = p_0 + (p_1 - p_0) + (p_2 - p_1) = 1 + q_0 + q_1 = 1 + 2q_0,$$

⋮

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

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, $p_1 - 1 = q_0 = q_1 = \cdots = q_{3n-1}$ なので

$$p_1 = p_0 + (p_1 - p_0) = 1 + q_0,$$

$$p_2 = p_0 + (p_1 - p_0) + (p_2 - p_1) = 1 + q_0 + q_1 = 1 + 2q_0,$$

$$\vdots$$

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

$$\vdots$$

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

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, $p_1 - 1 = q_0 = q_1 = \cdots = q_{3n-1}$ なので

$$p_1 = p_0 + (p_1 - p_0) = 1 + q_0,$$

$$p_2 = p_0 + (p_1 - p_0) + (p_2 - p_1) = 1 + q_0 + q_1 = 1 + 2q_0,$$

$$\vdots$$

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

$$\vdots$$

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

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, $p_1 - 1 = q_0 = q_1 = \cdots = q_{3n-1}$ なので

$$p_1 = p_0 + (p_1 - p_0) = 1 + q_0,$$

$$p_2 = p_0 + (p_1 - p_0) + (p_2 - p_1) = 1 + q_0 + q_1 = 1 + 2q_0,$$

$$\vdots$$

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

$$\vdots$$

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

- ▶ したがって, $q_0 = -\frac{1}{3n}$

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, $p_1 - 1 = q_0 = q_1 = \cdots = q_{3n-1}$ なので

$$p_1 = p_0 + (p_1 - p_0) = 1 + q_0,$$

$$p_2 = p_0 + (p_1 - p_0) + (p_2 - p_1) = 1 + q_0 + q_1 = 1 + 2q_0,$$

$$\vdots$$

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

$$\vdots$$

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

- ▶ したがって, $q_0 = -\frac{1}{3n}$

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

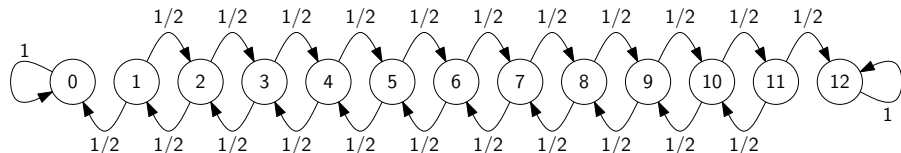
終了するまでに賭けを行う回数 (期待値) : 漸化式 (1)

興味の対象

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

- ▶ 次の期待値を考える

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



終了するまでに賭けを行う回数 (期待値) : 漸化式 (1)

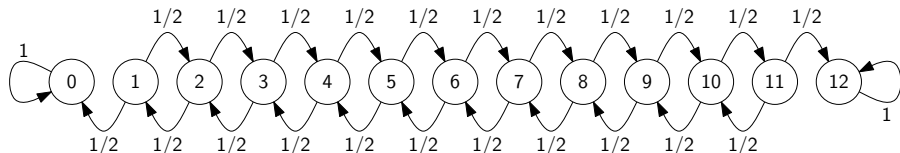
興味の対象

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



終了するまでに賭けを行う回数 (期待値) : 漸化式 (1)

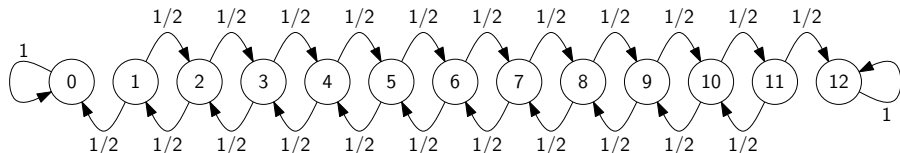
興味の対象

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

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

終了するまでに賭けを行う回数 (期待値) : 漸化式 (1)

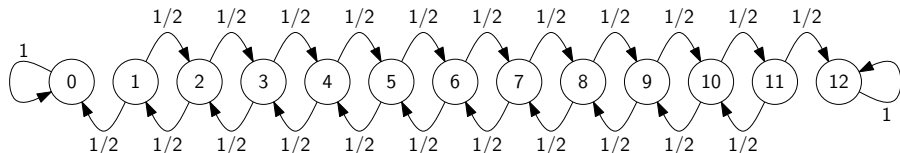
興味の対象

$T_n = E[\min\{t \mid X_t \in \{0, 3n\}\} \mid X_0 = n]$ (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?

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

終了するまでに賭けを行う回数 (期待値) : 漸化式 (2)

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

終了するまでに賭けを行う回数 (期待値) : 漸化式 (2)

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

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

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

終了するまでに賭けを行う回数 (期待値) : 漸化式 (2)

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

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

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

終了するまでに賭けを行う回数 (期待値) : 漸化式 (2)

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

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

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

終了するまでに賭けを行う回数 (期待値) : 漸化式 (2)

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

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

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

終了するまでに賭けを行う回数 (期待値) : 漸化式を解く (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,

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

終了するまでに賭けを行う回数 (期待値) : 漸化式を解く (2)

$$T_{n,1} = T_{n,0} + (T_{n,1} - T_{n,0}) = U_0,$$

終了するまでに賭けを行う回数 (期待値) : 漸化式を解く (2)

$$T_{n,1} = T_{n,0} + (T_{n,1} - T_{n,0}) = U_0,$$

$$\begin{aligned} T_{n,2} &= T_{n,0} + (T_{n,1} - T_{n,0}) + (T_{n,2} - T_{n,1}) \\ &= U_0 + U_1 = U_0 + U_0 - 2 = 2U_0 - 2, \end{aligned}$$

終了するまでに賭けを行う回数 (期待値) : 漸化式を解く (2)

$$T_{n,1} = T_{n,0} + (T_{n,1} - T_{n,0}) = U_0,$$

$$\begin{aligned} T_{n,2} &= T_{n,0} + (T_{n,1} - T_{n,0}) + (T_{n,2} - T_{n,1}) \\ &= U_0 + U_1 = U_0 + U_0 - 2 = 2U_0 - 2, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} T_{n,3} &= T_{n,0} + (T_{n,1} - T_{n,0}) + (T_{n,2} - T_{n,1}) + (T_{n,3} - T_{n,2}) \\ &= U_0 + U_1 + U_2 = U_0 + U_0 - 2 + U_0 - 4 = 3U_0 - 6, \end{aligned}$$

終了するまでに賭けを行う回数 (期待値) : 漸化式を解く (2)

$$T_{n,1} = T_{n,0} + (T_{n,1} - T_{n,0}) = U_0,$$

$$\begin{aligned} T_{n,2} &= T_{n,0} + (T_{n,1} - T_{n,0}) + (T_{n,2} - T_{n,1}) \\ &= U_0 + U_1 = U_0 + U_0 - 2 = 2U_0 - 2, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} T_{n,3} &= T_{n,0} + (T_{n,1} - T_{n,0}) + (T_{n,2} - T_{n,1}) + (T_{n,3} - T_{n,2}) \\ &= U_0 + U_1 + U_2 = U_0 + U_0 - 2 + U_0 - 4 = 3U_0 - 6, \end{aligned}$$

⋮

$$T_{n,k} = T_{n,0} + \sum_{i=0}^{k-1} (T_{n,i+1} - T_{n,i}) = kU_0 - k(k-1),$$

終了するまでに賭けを行う回数 (期待値) : 漸化式を解く (2)

$$T_{n,1} = T_{n,0} + (T_{n,1} - T_{n,0}) = U_0,$$

$$\begin{aligned} T_{n,2} &= T_{n,0} + (T_{n,1} - T_{n,0}) + (T_{n,2} - T_{n,1}) \\ &= U_0 + U_1 = U_0 + U_0 - 2 = 2U_0 - 2, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} T_{n,3} &= T_{n,0} + (T_{n,1} - T_{n,0}) + (T_{n,2} - T_{n,1}) + (T_{n,3} - T_{n,2}) \\ &= U_0 + U_1 + U_2 = U_0 + U_0 - 2 + U_0 - 4 = 3U_0 - 6, \end{aligned}$$

$$\vdots$$

$$T_{n,k} = T_{n,0} + \sum_{i=0}^{k-1} (T_{n,i+1} - T_{n,i}) = kU_0 - k(k-1),$$

$$\vdots$$

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

終了するまでに賭けを行う回数 (期待値) : 漸化式を解く (2)

$$T_{n,1} = T_{n,0} + (T_{n,1} - T_{n,0}) = U_0,$$

$$\begin{aligned} T_{n,2} &= T_{n,0} + (T_{n,1} - T_{n,0}) + (T_{n,2} - T_{n,1}) \\ &= U_0 + U_1 = U_0 + U_0 - 2 = 2U_0 - 2, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} T_{n,3} &= T_{n,0} + (T_{n,1} - T_{n,0}) + (T_{n,2} - T_{n,1}) + (T_{n,3} - T_{n,2}) \\ &= U_0 + U_1 + U_2 = U_0 + U_0 - 2 + U_0 - 4 = 3U_0 - 6, \end{aligned}$$

$$\vdots$$

$$T_{n,k} = T_{n,0} + \sum_{i=0}^{k-1} (T_{n,i+1} - T_{n,i}) = kU_0 - k(k-1),$$

$$\vdots$$

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

終了するまでに賭けを行う回数 (期待値) : 漸化式を解く (3)

$$\begin{aligned} T_{n,k} &= kU_0 - k(k-1) \quad (k \in \{1, 2, \dots, 3n\}), \\ 0 = T_{n,3n} &= 3nU_0 - 3n(3n-1) \end{aligned}$$

終了するまでに賭けを行う回数 (期待値) : 漸化式を解く (3)

$$\begin{aligned} T_{n,k} &= kU_0 - k(k-1) \quad (k \in \{1, 2, \dots, 3n\}), \\ 0 = T_{n,3n} &= 3nU_0 - 3n(3n-1) \end{aligned}$$

▶ したがって, $U_0 = 3n - 1$

終了するまでに賭けを行う回数 (期待値) : 漸化式を解く (3)

$$\begin{aligned} T_{n,k} &= kU_0 - k(k-1) \quad (k \in \{1, 2, \dots, 3n\}), \\ 0 = T_{n,3n} &= 3nU_0 - 3n(3n-1) \end{aligned}$$

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

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

終了するまでに賭けを行う回数 (期待値) : 漸化式を解く (3)

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

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

- ▶ 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,

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

終了するまでに賭けを行う回数 (期待値) : 漸化式を解く (3)

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

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

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

ギャンブラーの破産：設定

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

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

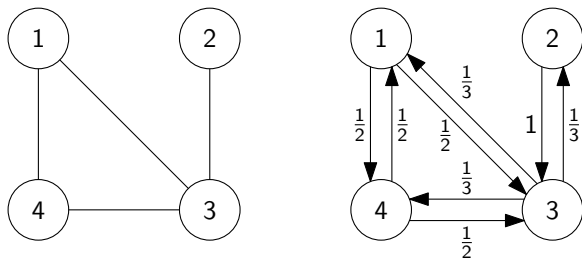
目次

- 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

有限グラフ上のランダムウォーク：設定

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, $\langle X_t \mid t \in \mathbb{N} \rangle$ 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

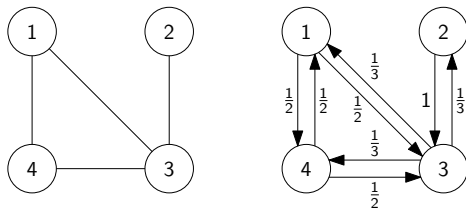
有限グラフ上のランダムウォーク：興味の対象

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、

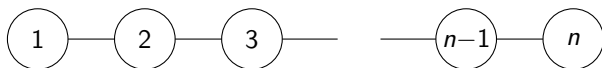
$$\tau_{u,v} = \min\{t \geq 0 \mid X_t = v, X_0 = u\}$$



- ▶ 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

到達時刻：道の場合 (1)

次のグラフを考える (頂点数 n の道)



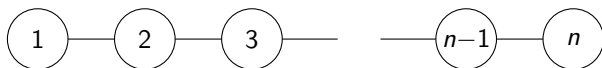
左端の頂点を 1, 右端の頂点を n として, $E[\tau_{1,n}]$ を計算する

- ▶ グラフの形状から次が分かる

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

到達時刻：道の場合 (1)

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

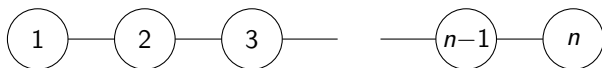
$$\tau_{1,n} = \tau_{1,2} + \tau_{2,3} + \cdots + \tau_{n-1,n}$$

- ▶ したがって, 期待値の線形性より

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

到達時刻：道の場合 (1)

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

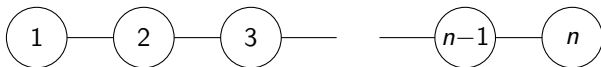
$$\tau_{1,n} = \tau_{1,2} + \tau_{2,3} + \cdots + \tau_{n-1,n}$$

- ▶ したがって, 期待値の線形性より

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

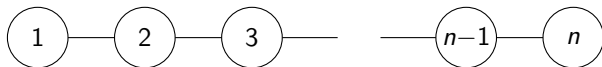
- ▶ つまり, 任意の $i \in \{1, \dots, n-1\}$ に対する $E[\tau_{i,i+1}]$ が分かればよい

到達時刻：道の場合 (2) — 漸化式の導出



- ▶ まず, $E[\tau_{1,2}] = 1$

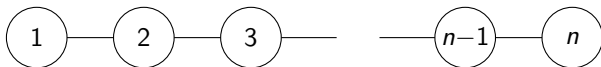
到達時刻：道の場合 (2) — 漸化式の導出



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

$$E[\tau_{i,i+1}] = 1 \cdot \frac{1}{2} + (1 + E[\tau_{i-1,i+1}]) \cdot \frac{1}{2}$$

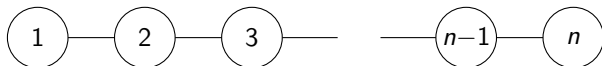
到達時刻：道の場合 (2) — 漸化式の導出



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

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

到達時刻：道の場合 (2) — 漸化式の導出



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

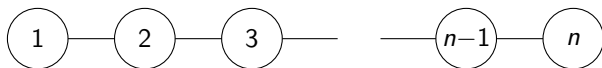
$$\begin{aligned}
 E[\tau_{i,i+1}] &= 1 \cdot \frac{1}{2} + (1 + E[\tau_{i-1,i+1}]) \cdot \frac{1}{2} \\
 &= 1 + \frac{1}{2}(E[\tau_{i-1,i}] + E[\tau_{i,i+1}]) \\
 \therefore E[\tau_{i,i+1}] &= 2 + E[\tau_{i-1,i}]
 \end{aligned}$$

到達時刻：道の場合 (3) — 結論

- ▶ 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、 $a_i = 2i - 1$



到達時刻：道の場合 (3) — 結論

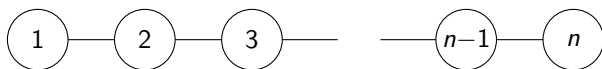
- ▶ したがって、 $a_i = E[\tau_{i,i+1}]$ と置くと

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

- ▶ 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、 $E[\tau_{i,i+1}] = 2i - 1$



到達時刻：道の場合 (3) — 結論

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

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

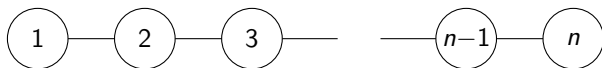
- ▶ これを解くと、任意の $i \in \{1, \dots, n-1\}$ に対して、 $a_i = 2i - 1$

証明したこと

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

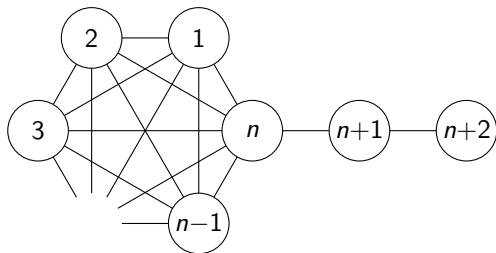
以上の考察をまとめると、

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



到達時刻：完全グラフ + 道の場合

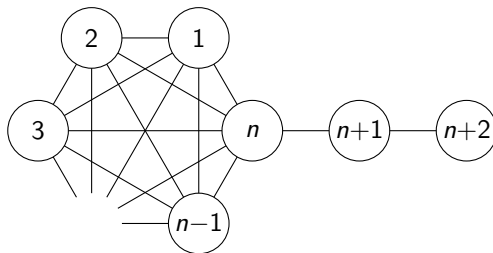
次のグラフを考える (頂点数 n の完全グラフに長さ 2 の道を追加)



$E[\tau_{1,n+2}]$ を計算する

到達時刻：完全グラフ + 道の場合

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)



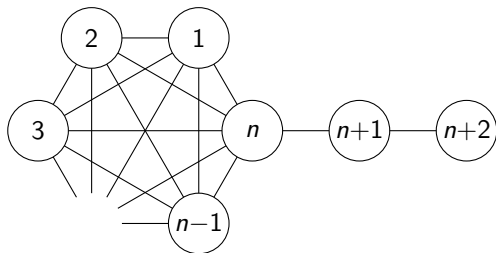
$E[\tau_{1,n+2}]$ を計算する

- ▶ グラフの形状から次が分かる

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

到達時刻：完全グラフ + 道の場合

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

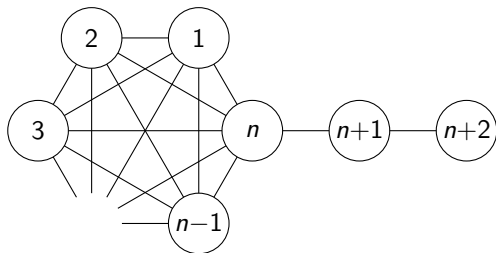
$$\tau_{1,n+2} = \tau_{1,n} + \tau_{n,n+1} + \tau_{n+1,n+2}$$

- ▶ したがって、期待値の線形性から

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

到達時刻：完全グラフ + 道の場合

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

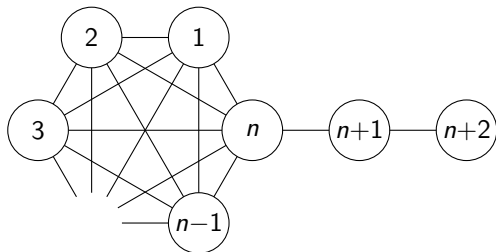
$$\tau_{1,n+2} = \tau_{1,n} + \tau_{n,n+1} + \tau_{n+1,n+2}$$

- ▶ したがって、期待値の線形性から

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

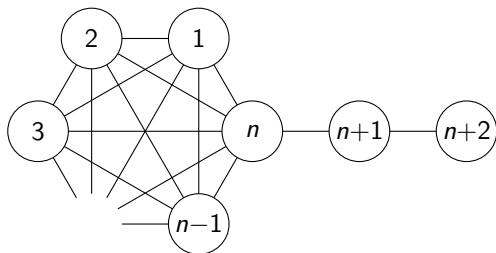
- ▶ つまり、 $E[\tau_{1,n}]$, $E[\tau_{n,n+1}]$, $E[\tau_{n+1,n+2}]$ が分かればよい

到達時刻：完全グラフ + 道の場合 (2)



$$E[\tau_{1,n}] = \frac{1}{n-1} \cdot 1 + \frac{n-2}{n-1} (1 + E[\tau_{1,n}])$$

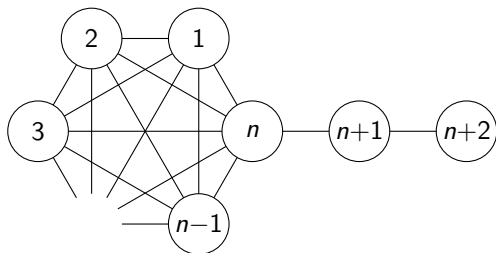
到達時刻：完全グラフ + 道の場合 (2)



$$E[\tau_{1,n}] = \frac{1}{n-1} \cdot 1 + \frac{n-2}{n-1} (1 + E[\tau_{1,n}])$$

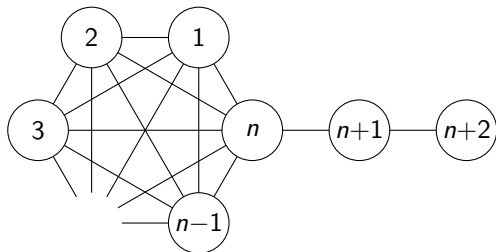
$$(n-1)E[\tau_{1,n}] = n-1 + (n-2)E[\tau_{1,n}]$$

到達時刻：完全グラフ + 道の場合 (2)



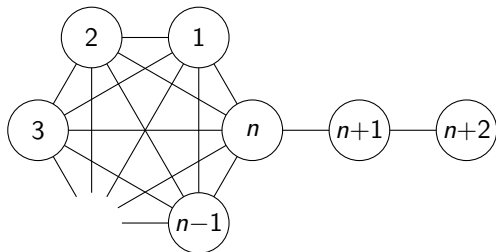
$$\begin{aligned}
 E[\tau_{1,n}] &= \frac{1}{n-1} \cdot 1 + \frac{n-2}{n-1} (1 + E[\tau_{1,n}]) \\
 (n-1)E[\tau_{1,n}] &= n-1 + (n-2)E[\tau_{1,n}] \\
 \therefore E[\tau_{1,n}] &= n-1
 \end{aligned}$$

到達時刻：完全グラフ + 道の場合 (3)



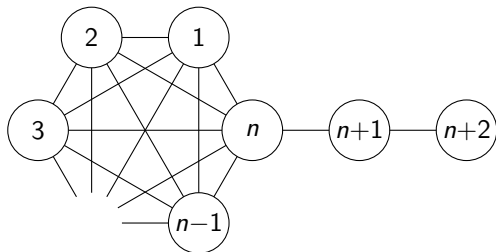
$$E[\tau_{n,n+1}] = \frac{1}{n} \cdot 1 + \frac{n-1}{n} (1 + E[\tau_{1,n}] + E[\tau_{n,n+1}])$$

到達時刻：完全グラフ + 道の場合 (3)



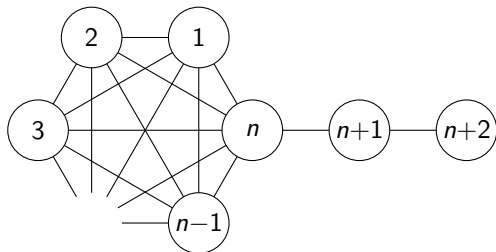
$$\begin{aligned}
 E[\tau_{n,n+1}] &= \frac{1}{n} \cdot 1 + \frac{n-1}{n} (1 + E[\tau_{1,n}] + E[\tau_{n,n+1}]) \\
 nE[\tau_{n,n+1}] &= n + (n-1)E[\tau_{1,n}] + (n-1)E[\tau_{n,n+1}]
 \end{aligned}$$

到達時刻：完全グラフ + 道の場合 (3)



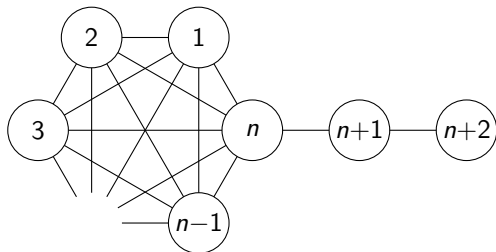
$$\begin{aligned}
 E[\tau_{n,n+1}] &= \frac{1}{n} \cdot 1 + \frac{n-1}{n} (1 + E[\tau_{1,n}] + E[\tau_{n,n+1}]) \\
 nE[\tau_{n,n+1}] &= n + (n-1)E[\tau_{1,n}] + (n-1)E[\tau_{n,n+1}] \\
 &= n + (n-1)^2 + (n-1)E[\tau_{n,n+1}]
 \end{aligned}$$

到達時刻：完全グラフ + 道の場合 (3)



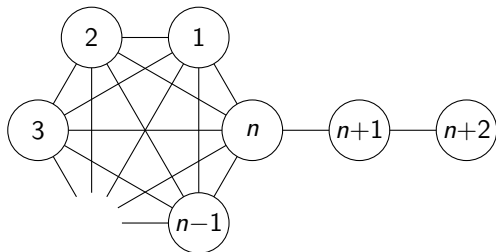
$$\begin{aligned}
 E[\tau_{n,n+1}] &= \frac{1}{n} \cdot 1 + \frac{n-1}{n} (1 + E[\tau_{1,n}] + E[\tau_{n,n+1}]) \\
 nE[\tau_{n,n+1}] &= n + (n-1)E[\tau_{1,n}] + (n-1)E[\tau_{n,n+1}] \\
 &= n + (n-1)^2 + (n-1)E[\tau_{n,n+1}] \\
 \therefore E[\tau_{n,n+1}] &= n + (n-1)^2 = n^2 - n + 1
 \end{aligned}$$

到達時刻：完全グラフ + 道の場合 (4)



$$E[\tau_{n+1, n+2}] = \frac{1}{2} \cdot 1 + \frac{1}{2}(1 + E[\tau_{n, n+1}] + E[\tau_{n+1, n+2}])$$

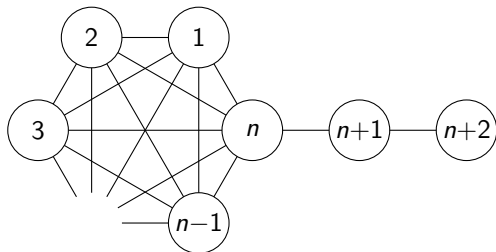
到達時刻：完全グラフ + 道の場合 (4)



$$E[\tau_{n+1, n+2}] = \frac{1}{2} \cdot 1 + \frac{1}{2}(1 + E[\tau_{n, n+1}] + E[\tau_{n+1, n+2}])$$

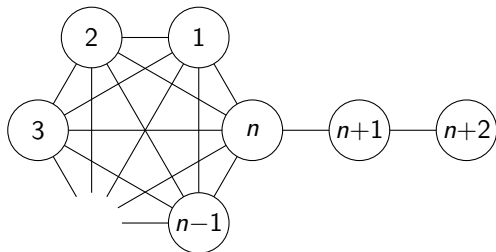
$$2E[\tau_{n+1, n+2}] = 2 + E[\tau_{n, n+1}] + E[\tau_{n+1, n+2}]$$

到達時刻：完全グラフ + 道の場合 (4)



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

到達時刻：完全グラフ + 道の場合 (4)

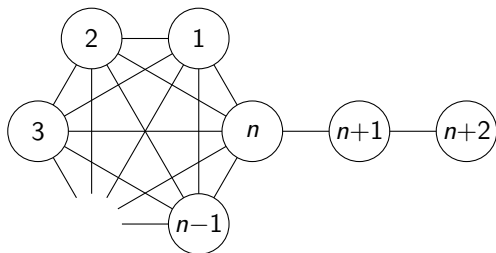


$$E[\tau_{n+1, n+2}] = \frac{1}{2} \cdot 1 + \frac{1}{2}(1 + E[\tau_{n, n+1}] + E[\tau_{n+1, n+2}])$$

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

$$\therefore E[\tau_{n+1, n+2}] = 2 + (n^2 - n + 1) = n^2 - n + 3$$

到達時刻：完全グラフ + 道の場合 (5)

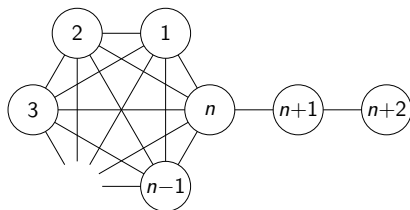


したがって,

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

到達時刻の比較

- ▶ 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

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

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

残った時間の使い方

- ▶ 授業評価アンケート
 - ▶ 科目番号「2442」，科目名「離散数理工学」，教員名「岡本 吉央」
- ▶ 演習問題をやる
 - ▶ 相談推奨 (ひとりでやらない)
- ▶ 質問をする
 - ▶ 教員と TA は巡回
- ▶ 退室時，小さな紙に感想など書いて提出する ← 重要
 - ▶ 内容は何でも OK
 - ▶ 匿名で OK

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