

DP

SCIST x NHDK x 南 11 校寒訓 - 資言資語

Koying

2023-02-02

本課程由以下贊助商贊助辦理



奧義智慧科技™
Powered by CyCraft

DEV✓CORE



少年圖靈計畫
Young Turing Program



TEAM T5
Persistent Cyber Threat Hunters



- DP 入門
- DP 實作
- 線性 DP
- 背包問題
- 子序列 DP
- DAG DP
- 樹 DP

DP 入門

- DP (Dynamic Programming)，動態規劃
- 利用將問題拆解成子問題的方式來解決問題
- 有些人可能聽過分治，同樣也是將問題拆解為子問題，比較不一樣的是 DP 主要是利用「記憶化的方式」，將許多會重複用到的子問題記錄下來
- DP 問題經常會有「最佳子結構」、「重疊子問題」兩大特徵
- 簡單用一句話來形容 DP 在做的事，便是將各種會用到多次，且最符合我們需要的答案記錄下來，以供之後使用，有點像是進階版的建表

費氏數列

求出 $F_n \bmod 10^9 + 7$ ($n \leq 10^6$)

- 以一般遞迴式的方式，我們會得到一個 $\mathcal{O}(2^n)$ 的複雜度，顯然是不符合我們的需求

費氏數列

求出 $F_n \bmod 10^9 + 7$ ($n \leq 10^6$)

- 以一般遞迴式的方式，我們會得到一個 $\mathcal{O}(2^n)$ 的複雜度，顯然是不符合我們的需求
- 如果將遞迴過程畫成一顆樹，會發現我們重複計算了很多「早就被算過」的東西

費氏數列

求出 $F_n \bmod 10^9 + 7$ ($n \leq 10^6$)

- 以一般遞迴式的方式，我們會得到一個 $\mathcal{O}(2^n)$ 的複雜度，顯然是不符合我們的需求
- 如果將遞迴過程畫成一顆樹，會發現我們重複計算了很多「早就被算過」的東西
- 如果能夠將已經算過的東西記錄下來，就能夠用「空間」換取大量的「時間」

費氏數列

求出 $F_n \bmod 10^9 + 7$ ($n \leq 10^6$)

- 以一般遞迴式的方式，我們會得到一個 $\mathcal{O}(2^n)$ 的複雜度，顯然是不符合我們的需求
- 如果將遞迴過程畫成一顆樹，會發現我們重複計算了很多「早就被算過」的東西
- 如果能夠將已經算過的東西記錄下來，就能夠用「空間」換取大量的「時間」
- 這便是 DP 最經典的「重疊子問題」例子。而以空間換取時間的做法，則被稱為「記憶化搜索」

路徑問題

給一個 $n \times m$ 的方格，求從左上角走到右下角的路徑數，且每步只能往右或往下走

- 相信有認真上課的學員都知道，這題就是將原點設為 1，然後對於每個點 i, j ，寫上 $i-1, j$ 、 $i, j-1$ 兩個點的和

路徑問題

給一個 $n \times m$ 的方格，求從左上角走到右下角的路徑數，且每步只能往右或往下走

- 相信有認真上課的學員都知道，這題就是將原點設為 1，然後對於每個點 i, j ，寫上 $i-1, j$ 、 $i, j-1$ 兩個點的和
- 其實這就是動態規劃！

路徑問題

給一個 $n \times m$ 的方格，求從左上角走到右下角的路徑數，且每步只能往右或往下走

- 相信有認真上課的學員都知道，這題就是將原點設為 1，然後對於每個點 i, j ，寫上 $i-1, j$ 、 $i, j-1$ 兩個點的和
- 其實這就是動態規劃！
- OK，學校都已經教過了，今天的課就到這邊

Grid Paths

路徑問題，有障礙物的版本

DP 的組成與實作

- DP 的運作過程由「狀態」、「轉移式」組成

DP 的兩大要素

- DP 的運作過程由「狀態」、「轉移式」組成
- 「狀態」指的是利用陣列在紀錄子問題答案時，其 `index` 所代表的意義
- 而「轉移式」代表的則是大的狀態與小的狀態之間的關係

DP 的兩大要素

- DP 的運作過程由「狀態」、「轉移式」組成
- 「狀態」指的是利用陣列在紀錄子問題答案時，其 index 所代表的意義
- 而「轉移式」代表的則是大的狀態與小的狀態之間的關係
- 以剛剛的費氏數列為例子，我們會將狀態定義為： dp_i 為費氏數列的第 i 項
- 而「轉移式」便是大家熟知的： $dp_i = dp_{i-1} + dp_{i-2}$

DP 的兩大要素

- DP 的運作過程由「狀態」、「轉移式」組成
- 「狀態」指的是利用陣列在紀錄子問題答案時，其 index 所代表的意義
- 而「轉移式」代表的則是大的狀態與小的狀態之間的關係
- 以剛剛的費氏數列為例子，我們會將狀態定義為： dp_i 為費氏數列的第 i 項
- 而「轉移式」便是大家熟知的： $dp_i = dp_{i-1} + dp_{i-2}$
- 這樣看似齊全了，但直接執行的話，會造成無限遞迴，因此我們還需要設計一個「邊界條件」，在這個例子便是 $dp_0 = 0, dp_1 = 1$

- 想要算出最終的狀態，主要有兩種方式：
 1. Top down：從最終狀態 (F_n)，利用遞迴往回推
 2. Bottom up：從初始狀態 (F_0)，利用迴圈往前算，直到算到最終狀態
- 至於為什麼這樣命名呢？如果我們將遞迴樹畫出來，便可很簡單的發現其端倪了！

Top down 的特性

- 只要推出轉移式與初始狀態，便可很教直觀的寫出程式碼
- 在某些情況可能會遞迴過深
- 遞迴常數較大，要注意可能會造成效能損失
- 範例程式碼：Top Down.cpp

- 子問題需比母問題早算出，因此需要想好迴圈的順序
- 若將各個狀態與其轉移點的關係畫成一張圖，則迴圈的順序便是圖論中的「拓樸排序」
- 速度快，除了省去了遞迴常數之外，也經常能因 CPU 的快取機制獲得一部分的效能提升
- 範例程式碼：Bottom up.cpp

前綴和

- 覺得 DP 很遙遠嗎？

- 覺得 DP 很遙遠嗎？
- 其實你們都已經會了！

- 覺得 DP 很遙遠嗎？
- 其實你們都已經會了！
- 其實前綴和就是一個簡單的 DP 問題

- 覺得 DP 很遙遠嗎？
- 其實你們都已經會了！
- 其實前綴和就是一個簡單的 DP 問題
- dp_i 為 $a_1 \sim a_i$ 的總和，轉移式就是 $dp_i = dp_{i-1} + a_i$

- 覺得 DP 很遙遠嗎？
- 其實你們都已經會了！
- 其實前綴和就是一個簡單的 DP 問題
- dp_i 為 $a_1 \sim a_i$ 的總和，轉移式就是 $dp_i = dp_{i-1} + a_i$
- 那如果是二維呢？

二維前綴和 - 排容

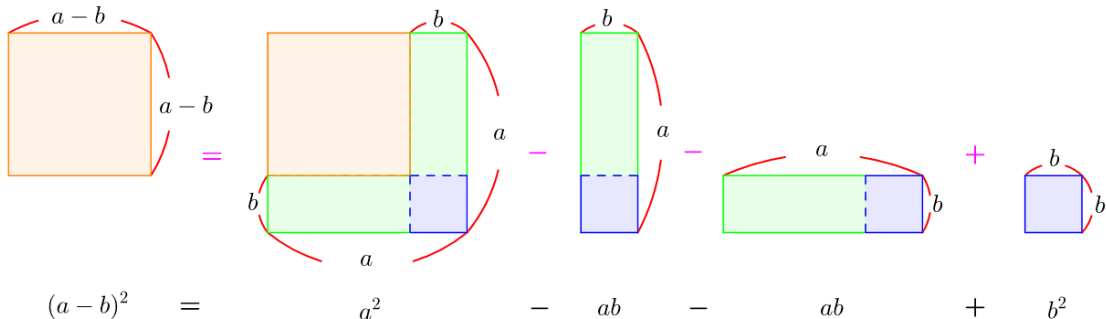
■ 狀態： $dp_{i,j}$ 為 $\sum_{k=1}^i \sum_{l=1}^j a_{i,j}$

二維前綴和 - 排容

- 狀態： $dp_{i,j}$ 為 $\sum_{k=1}^i \sum_{l=1}^j a_{i,j}$
- 如何轉移呢？相信大家國中時都學過一個公式： $(a + b)^2 = a^2 + b^2 + ab + ba$

二維前綴和 - 排容

- 狀態： $dp_{i,j}$ 為 $\sum_{k=1}^i \sum_{l=1}^j a_{i,j}$
- 如何轉移呢？相信大家國中時都學過一個公式： $(a+b)^2 = a^2 + b^2 + ab + ba$
- 這個公式便是利用排容原理，將重疊的部分扣除
-



- 那簡單！我們的轉移式就也用排容來算就好了

- 那簡單！我們的轉移式就也用排容來算就好了

- $$dp_{i,j} = \begin{cases} 0 & i = 0 \text{ or } j = 0 \\ dp_{i-1,j} + dp_{i,j-1} - dp_{i-1,j-1} + a_{i,j} & \text{otherwise} \end{cases}$$

- 那簡單！我們的轉移式就也用排容來算就好了

- $$dp_{i,j} = \begin{cases} 0 & i = 0 \text{ or } j = 0 \\ dp_{i-1,j} + dp_{i,j-1} - dp_{i-1,j-1} + a_{i,j} & \text{otherwise} \end{cases}$$

- 那如果我們要求出 $(x1, y1), (x1, y2), (x2, y1), (x2, y2)$ 這塊矩形的總和，一樣使用排容原理即可

- 那簡單！我們的轉移式就也用排容來算就好了

- $$dp_{i,j} = \begin{cases} 0 & i = 0 \text{ or } j = 0 \\ dp_{i-1,j} + dp_{i,j-1} - dp_{i-1,j-1} + a_{i,j} & \text{otherwise} \end{cases}$$

- 那如果我們要求出 $(x1, y1), (x1, y2), (x2, y1), (x2, y2)$ 這塊矩形的總和，一樣使用排容原理即可
- $dp_{x2,y2} - dp_{x1-1,y2} - dp_{x2,y1-1} + dp_{x1-1,y1-1}$

滾動優化

Grid Paths

路徑問題，有障礙物的版本

- 我們回到剛剛那題 Grid Path

Grid Paths

路徑問題，有障礙物的版本

- 我們回到剛剛那題 Grid Path
- 觀察後可以發現， dp_i 的轉移點都是在 dp_{i-1}
- 代表 $dp_1 \sim dp_{i-2}$ 都是沒用的

Grid Paths

路徑問題，有障礙物的版本

- 我們回到剛剛那題 Grid Path
- 觀察後可以發現， dp_i 的轉移點都是在 dp_{i-1}
- 代表 $dp_1 \sim dp_{i-2}$ 都是沒用的
- 那我們何不省點空間呢？

Grid Paths

路徑問題，有障礙物的版本

- 既然只用到兩列，那我們陣列就只開兩列 `dp[0]`、`dp[1]`

Grid Paths

路徑問題，有障礙物的版本

- 既然只用到兩列，那我們陣列就只開兩列 $dp[0]$ 、 $dp[1]$
- 當 $i \equiv 0 \pmod{2}$ 時，就使用 $dp[0]$ ，反之 $dp[1]$
- 這樣就可以將空間複雜度降到 n 了！

Grid Paths

路徑問題，有障礙物的版本

- 既然只用到兩列，那我們陣列就只開兩列 $dp[0]$ 、 $dp[1]$
- 當 $i \equiv 0 \pmod{2}$ 時，就使用 $dp[0]$ ，反之 $dp[1]$
- 這樣就可以將空間複雜度降到 n 了！
- 需要注意的是，陣列中可能還存著以前的資訊，所以要先記得初始化

Grid Paths

路徑問題，有障礙物的版本

- 既然只用到兩列，那我們陣列就只開兩列 $dp[0]$ 、 $dp[1]$
- 當 $i \equiv 0 \pmod{2}$ 時，就使用 $dp[0]$ ，反之 $dp[1]$
- 這樣就可以將空間複雜度降到 n 了！
- 需要注意的是，陣列中可能還存著以前的資訊，所以要先記得初始化
- 一些小技巧：
 - 偶 0 奇 1： $i \& 2$
 - 偶 1 奇 0： $i \& 1$

線性 DP

AtCoder DP Contest A - Frog 1

每顆石頭的高度為 h_i ，從第 i 顆跳到第 j 顆的代價是 $|h_i - h_j|$ 每次可以跳 1 或 2 格，求從第 1 格跳到第 N 格的最小代價

- 首先我們先訂定狀態： dp_i 為目前停在第 i 格的最小代價

AtCoder DP Contest A - Frog 1

每顆石頭的高度為 h_i ，從第 i 顆跳到第 j 顆的代價是 $|h_i - h_j|$ 每次可以跳 1 或 2 格，求從第 1 格跳到第 N 格的最小代價

- 首先我們先訂定狀態： dp_i 為目前停在第 i 格的最小代價
- 經由題目可知，第 i 格可由第 $i-1, i-2$ 格得來，因此 $i-1, i-2$ 便是 i 的「轉移點」

AtCoder DP Contest A - Frog 1

每顆石頭的高度為 h_i ，從第 i 顆跳到第 j 顆的代價是 $|h_i - h_j|$ 每次可以跳 1 或 2 格，求從第 1 格跳到第 N 格的最小代價

- 首先我們先訂定狀態： dp_i 為目前停在第 i 格的最小代價
- 經由題目可知，第 i 格可由第 $i-1, i-2$ 格得來，因此 $i-1, i-2$ 便是 i 的「轉移點」
- 有了轉移點之後，我們就能夠推出轉移式：

$dp_i = \min(dp_{i-1} + |h_i - h_{i-1}|, dp_{i-2} + |h_i - h_{i-2}|)$ ，而初始狀態則是：

$dp_1 = 0, dp_2 = |h_1 - h_2|$

AtCoder DP Contest A - Frog 1

每顆石頭的高度為 h_i ，從第 i 顆跳到第 j 顆的代價是 $|h_i - h_j|$ 每次可以跳 1 或 2 格，求從第 1 格跳到第 N 格的最小代價

- 首先我們先訂定狀態： dp_i 為目前停在第 i 格的最小代價
- 經由題目可知，第 i 格可由第 $i-1, i-2$ 格得來，因此 $i-1, i-2$ 便是 i 的「轉移點」
- 有了轉移點之後，我們就能夠推出轉移式：
 $dp_i = \min(dp_{i-1} + |h_i - h_{i-1}|, dp_{i-2} + |h_i - h_{i-2}|)$ ，而初始狀態則是：
 $dp_1 = 0, dp_2 = |h_1 - h_2|$
- 時間複雜度 $\mathcal{O}(n)$

AtCoder DP Contest A - Frog 1

每顆石頭的高度為 h_i ，從第 i 顆跳到第 j 顆的代價是 $|h_i - h_j|$ 每次可以跳 1 或 2 格，求從第 1 格跳到第 N 格的最小代價

- 首先我們先訂定狀態： dp_i 為目前停在第 i 格的最小代價
- 經由題目可知，第 i 格可由第 $i-1, i-2$ 格得來，因此 $i-1, i-2$ 便是 i 的「轉移點」
- 有了轉移點之後，我們就能夠推出轉移式：
 $dp_i = \min(dp_{i-1} + |h_i - h_{i-1}|, dp_{i-2} + |h_i - h_{i-2}|)$ ，而初始狀態則是：
 $dp_1 = 0, dp_2 = |h_1 - h_2|$
- 時間複雜度 $\mathcal{O}(n)$
- 這種有關線性遞迴的 DP 便稱為「線性 DP」

AtCoder DP Contest A - Frog 1

每顆石頭的高度為 h_i ，從第 i 顆跳到第 j 顆的代價是 $|h_i - h_j|$ 每次可以跳 1 或 2 格，求從第 1 格跳到第 N 格的最小代價

- 首先我們先訂定狀態： dp_i 為目前停在第 i 格的最小代價
- 經由題目可知，第 i 格可由第 $i-1, i-2$ 格得來，因此 $i-1, i-2$ 便是 i 的「轉移點」
- 有了轉移點之後，我們就能夠推出轉移式：

$dp_i = \min(dp_{i-1} + |h_i - h_{i-1}|, dp_{i-2} + |h_i - h_{i-1}|)$ ，而初始狀態則是：

$$dp_1 = 0, dp_2 = |h_1 - h_2|$$

- 時間複雜度 $\mathcal{O}(n)$
- 這種有關線性遞迴的 DP 便稱為「線性 DP」

$$dp_i = \begin{cases} 0 & \text{if } i = 1 \\ |h_1 - h_2| & \text{if } i = 2 \\ \min(dp_{i-1} + |h_i - h_{i-1}|, dp_{i-2} + |h_i - h_{i-1}|) & \text{otherwise} \end{cases}$$

CSES Dice Combinations

你有無限多顆六面骰，求丟出的點數總和為 n 的方法數

- 解決一些排列組合問題也是 DP 的其中一個用處

CSES Dice Combinations

你有無限多顆六面骰，求丟出的點數總和為 n 的方法數

- 解決一些排列組合問題也是 DP 的其中一個用處
- 狀態應該不難訂： dp_i 為丟出的點數總和為 i 的方法數

CSES Dice Combinations

你有無限多顆六面骰，求丟出的點數總和為 n 的方法數

- 解決一些排列組合問題也是 DP 的其中一個用處
- 狀態應該不難訂： dp_i 為丟出的點數總和為 i 的方法數
- 觀察一下題目條件，可以發現當目前點數為 $i - 6 \sim i - 1$ 時，再丟一顆骰子，點數和就有機會變成 i

CSES Dice Combinations

你有無限多顆六面骰，求丟出的點數總和為 n 的方法數

- 解決一些排列組合問題也是 DP 的其中一個用處
- 狀態應該不難訂： dp_i 為丟出的點數總和為 i 的方法數
- 觀察一下題目條件，可以發現當目前點數為 $i - 6 \sim i - 1$ 時，再丟一顆骰子，點數和就有機會變成 i
- 因此 $i - 1 \sim i - 6$ 便是 i 的轉移點

CSES Dice Combinations

你有無限多顆六面骰，求丟出的點數總和為 n 的方法數

- 解決一些排列組合問題也是 DP 的其中一個用處
- 狀態應該不難訂： dp_i 為丟出的點數總和為 i 的方法數
- 觀察一下題目條件，可以發現當目前點數為 $i - 6 \sim i - 1$ 時，再丟一顆骰子，點數和就有機會變成 i
- 因此 $i - 1 \sim i - 6$ 便是 i 的轉移點

■ 最終轉移式：
$$dp_i = \begin{cases} 1 & \text{if } i = 0 \\ \sum_{j=1}^i dp_j & \text{if } i \leq 6 \\ \sum_{j=i-6}^{i-1} dp_j & \text{otherwise} \end{cases}$$

例題

AtCoder DP Contest A - Frog 1

每顆石頭的高度為 h_i ，從第 i 顆跳到第 j 顆的代價是 $|h_i - h_j|$ 每次可以跳 1 或 2 格，求從第 1 格跳到第 N 格的最小代價

CSES Dice Combinations

你有無限多顆六面骰，求丟出的點數總和為 n 的方法數

AtCoder DP Contest B - Frog 2

每顆石頭的高度為 h_i ，從第 i 顆跳到第 j 顆的代價是 $|h_i - h_j|$ 每次可以跳 $1 \sim k$ 格，求從第 1 格跳到第 N 格的最小代價

2020 台南一中 x 台南女中聯合寒訓 pD. 公假無雙

見原題

例題

AtCoder DP Contest C - Vacation

每天有三種活動，每種活動都有一個分數，求相鄰兩天不為同一活動時的最大分數和

CSES Removing Digits

給定一數字 n ，每次可以減去 n 的任意一位數字，求最少減幾次可以減到 0 ($n \leq 10^6$)
如：27 \rightarrow 20 \rightarrow 18 \rightarrow 10 \rightarrow 9 \rightarrow 0

CF 1625C. Road Optimization

一條長度為 l 的道路上有 n 個限速牌，每個限速牌上會寫著一個數字 a_i ，代表車子以最高限速行駛時，每公里需要花 a_i ，而車子經過該車速牌就會調整車速為限速牌上的最高時速。

你可以移除最多 k 個限速牌，求車子開過所需的最少時間

背包問題

- 背包問題算是 DP 中最經典的題型，網路上直接搜尋動態規劃大概十篇有九篇都是背包問題
- 背包問題主要分為三種：
 1. 0-1 背包問題：每種物品只有一個
 2. 無限背包問題：每種物品有無限個
 3. 有限背包問題：每種物品有有限個
- 今天的課程會提到前兩種（其實也是線性 DP 的變種）

0-1 背包問題

AtCoder DP Contest D - Knapsack 1

有 N 種物品，每種物品的重量為 w_i ，價值為 v_i ，背包的容量為 W ，求背包裡的物品的最大價值

($N \leq 100, W \leq 10^5, w_i \leq W, v_i \leq 10^9$)

- 題目問的是最多裝 W 的最大價值，那我們就用重量當作狀態吧！ dp_i 代表重量為 i 時的最大價值

0-1 背包問題

AtCoder DP Contest D - Knapsack 1

有 N 種物品，每種物品的重量為 w_i ，價值為 v_i ，背包的容量為 W ，求背包裡的物品的最大價值

($N \leq 100, W \leq 10^5, w_i \leq W, v_i \leq 10^9$)

- 題目問的是最多裝 W 的最大價值，那我們就用重量當作狀態吧！ dp_i 代表重量為 i 時的最大價值
- 對於重量 i ，可以透過拿取第 j 種物品讓重量變為 $i + w_j$ ，因此轉移點為 $i - w_j$

0-1 背包問題

AtCoder DP Contest D - Knapsack 1

有 N 種物品，每種物品的重量為 w_i ，價值為 v_i ，背包的容量為 W ，求背包裡的物品的最大價值

($N \leq 100, W \leq 10^5, w_i \leq W, v_i \leq 10^9$)

- 題目問的是最多裝 W 的最大價值，那我們就用重量當作狀態吧！ dp_i 代表重量為 i 時的最大價值
- 對於重量 i ，可以透過拿取第 j 種物品讓重量變為 $i + w_j$ ，因此轉移點為 $i - w_j$
- 那我們就可以很輕鬆的推出轉移式了！

0-1 背包問題

AtCoder DP Contest D - Knapsack 1

有 N 種物品，每種物品的重量為 w_i ，價值為 v_i ，背包的容量為 W ，求背包裡的物品的最大價值

($N \leq 100, W \leq 10^5, w_i \leq W, v_i \leq 10^9$)

- 題目問的是最多裝 W 的最大價值，那我們就用重量當作狀態吧！ dp_i 代表重量為 i 時的最大價值
- 對於重量 i ，可以透過拿取第 j 種物品讓重量變為 $i + w_j$ ，因此轉移點為 $i - w_j$
- 那我們就可以很輕鬆的推出轉移式了！
- $$dp_i = \begin{cases} 0 & \text{if } i < 0 \\ \max(dp_i, dp_{i-w_j} + v_j) & \text{otherwise} \end{cases}$$

0-1 背包問題

AtCoder DP Contest D - Knapsack 1

有 N 種物品，每種物品的重量為 w_i ，價值為 v_i ，背包的容量為 W ，求背包裡的物品的最大價值

($N \leq 100, W \leq 10^5, w_i \leq W, v_i \leq 10^9$)

- 題目問的是最多裝 W 的最大價值，那我們就用重量當作狀態吧！ dp_i 代表重量為 i 時的最大價值
- 對於重量 i ，可以透過拿取第 j 種物品讓重量變為 $i + w_j$ ，因此轉移點為 $i - w_j$
- 那我們就可以很輕鬆的推出轉移式了！
- $$dp_i = \begin{cases} 0 & \text{if } i < 0 \\ \max(dp_i, dp_{i-w_j} + v_j) & \text{otherwise} \end{cases}$$
- 實作小細節：由於要求最大價值，因此對於所有 $i > 0$ ， dp_i 的初始值為 $-\infty$ ，最後答案便是最大的 i 滿足 $dp_i > 0$

0-1 背包問題

AtCoder DP Contest E - Knapsack 2

有 N 種物品，每種物品的重量為 w_i ，價值為 v_i ，背包的容量為 W ，求背包裡的物品的最小重量

($N \leq 100, W \leq 10^9, w_i \leq W, v_i \leq 10^3$)

- 可以發現 W 最大來到了 10^9 ，因此我們需要更改狀態設計

0-1 背包問題

AtCoder DP Contest E - Knapsack 2

有 N 種物品，每種物品的重量為 w_i ，價值為 v_i ，背包的容量為 W ，求背包裡的物品的最小重量

($N \leq 100, W \leq 10^9, w_i \leq W, v_i \leq 10^3$)

- 可以發現 W 最大來到了 10^9 ，因此我們需要更改狀態設計
- 除了重量，還有甚麼可以當作狀態呢？

0-1 背包問題

AtCoder DP Contest E - Knapsack 2

有 N 種物品，每種物品的重量為 w_i ，價值為 v_i ，背包的容量為 W ，求背包裡的物品的最小重量

$(N \leq 100, W \leq 10^9, w_i \leq W, v_i \leq 10^3)$

- 可以發現 W 最大來到了 10^9 ，因此我們需要更改狀態設計
- 除了重量，還有甚麼可以當作狀態呢？
- 觀察一下題目，發現最多裝 W 的最大價值，可以轉換為最大價值且最多裝 W ，因此可以換個方向，改以價值當作狀態

0-1 背包問題

AtCoder DP Contest E - Knapsack 2

有 N 種物品，每種物品的重量為 w_i ，價值為 v_i ，背包的容量為 W ，求背包裡的物品的最小重量

($N \leq 100, W \leq 10^9, w_i \leq W, v_i \leq 10^3$)

- 可以發現 W 最大來到了 10^9 ，因此我們需要更改狀態設計
- 除了重量，還有甚麼可以當作狀態呢？
- 觀察一下題目，發現最多裝 W 的最大價值，可以轉換為最大價值且最多裝 W ，因此可以換個方向，改以價值當作狀態
- dp_i 代表價值 i 時所需的最小重量

0-1 背包問題

AtCoder DP Contest E - Knapsack 2

有 N 種物品，每種物品的重量為 w_i ，價值為 v_i ，背包的容量為 W ，求背包裡的物品的最小重量

$(N \leq 100, W \leq 10^9, w_i \leq W, v_i \leq 10^3)$

- 可以發現 W 最大來到了 10^9 ，因此我們需要更改狀態設計
- 除了重量，還有甚麼可以當作狀態呢？
- 觀察一下題目，發現最多裝 W 的最大價值，可以轉換為最大價值且最多裝 W ，因此可以換個方向，改以價值當作狀態
- dp_i 代表價值 i 時所需的最小重量
- $$dp_i = \begin{cases} 0 & \text{if } i = 0 \\ \min(dp_i, dp_{i-v_j} + w_j) & \text{otherwise} \end{cases}$$

0-1 背包問題

AtCoder DP Contest E - Knapsack 2

有 N 種物品，每種物品的重量為 w_i ，價值為 v_i ，背包的容量為 W ，求背包裡的物品的最小重量

($N \leq 100, W \leq 10^9, w_i \leq W, v_i \leq 10^3$)

- 可以發現 W 最大來到了 10^9 ，因此我們需要更改狀態設計
- 除了重量，還有甚麼可以當作狀態呢？
- 觀察一下題目，發現最多裝 W 的最大價值，可以轉換為最大價值且最多裝 W ，因此可以換個方向，改以價值當作狀態
- dp_i 代表價值 i 時所需的最小重量
- $$dp_i = \begin{cases} 0 & \text{if } i = 0 \\ \min(dp_i, dp_{i-v_j} + w_j) & \text{otherwise} \end{cases}$$
- 初始狀態： $dp_i = \infty$ ($i > 0$)，答案就是最大的 i 滿足 $dp_i \leq W$

Minimizing Coins

硬幣問題，有無限個面額為 c_1, c_2, \dots, c_n 的硬幣，求湊出 x 元的最少硬幣數量
($n \leq 100, x, c_i \leq 10^6$)

- 還記得貪心課講到的硬幣問題嗎？當面額不存在倍數關係時，就可以用 DP 來解決！

Minimizing Coins

硬幣問題，有無限個面額為 c_1, c_2, \dots, c_n 的硬幣，求湊出 x 元的最少硬幣數量
($n \leq 100, x, c_i \leq 10^6$)

- 還記得貪心課講到的硬幣問題嗎？當面額不存在倍數關係時，就可以用 DP 來解決！
- 題目要問湊出 x 的最少數量，那我們就用總和當作狀態

Minimizing Coins

硬幣問題，有無限個面額為 c_1, c_2, \dots, c_n 的硬幣，求湊出 x 元的最少硬幣數量
($n \leq 100, x, c_i \leq 10^6$)

- 還記得貪心課講到的硬幣問題嗎？當面額不存在倍數關係時，就可以用 DP 來解決！
- 題目要問湊出 x 的最少數量，那我們就用總和當作狀態
- dp_i 為湊出 i 元的最少硬幣數量

Minimizing Coins

硬幣問題，有無限個面額為 c_1, c_2, \dots, c_n 的硬幣，求湊出 x 元的最少硬幣數量
($n \leq 100, x, c_i \leq 10^6$)

- 還記得貪心課講到的硬幣問題嗎？當面額不存在倍數關係時，就可以用 DP 來解決！
- 題目要問湊出 x 的最少數量，那我們就用總和當作狀態
- dp_i 為湊出 i 元的最少硬幣數量
- $$dp_i = \begin{cases} 0 & \text{if } i = 0 \\ \min(dp_i, dp_{i-c_j} + 1) & \text{otherwise} \end{cases}$$

Minimizing Coins

硬幣問題，有無限個面額為 c_1, c_2, \dots, c_n 的硬幣，求湊出 x 元的最少硬幣數量
($n \leq 100, x, c_i \leq 10^6$)

- 還記得貪心課講到的硬幣問題嗎？當面額不存在倍數關係時，就可以用 DP 來解決！
- 題目要問湊出 x 的最少數量，那我們就用總和當作狀態
- dp_i 為湊出 i 元的最少硬幣數量
- $$dp_i = \begin{cases} 0 & \text{if } i = 0 \\ \min(dp_i, dp_{i-c_j} + 1) & \text{otherwise} \end{cases}$$
- 初始狀態： $dp_i = \infty$ ($i > 0$)，答案就是 dp_x

跟排列組合有關的背包問題

CSES Coin Combinations I

你有面額為 c_1, c_2, \dots, c_n 的硬幣，求湊出 x 元的方案數量， $[1, 2, 3]$ 、 $[1, 3, 2]$ 算是兩種 ($n \leq 100, x, c_i \leq 10^6$)

- 狀態應該很明顯： dp_i 為湊出 i 元的方法數

跟排列組合有關的背包問題

CSES Coin Combinations I

你有面額為 c_1, c_2, \dots, c_n 的硬幣，求湊出 x 元的方案數量， $[1, 2, 3]$ 、 $[1, 3, 2]$ 算是兩種 ($n \leq 100, x, c_i \leq 10^6$)

- 狀態應該很明顯： dp_i 為湊出 i 元的方法數
- 轉移式：
$$dp_i = \begin{cases} 1 & \text{if } i = 0 \\ \sum_{j=1}^n dp_{i-c_j} & \text{otherwise} \end{cases}$$

跟排列組合有關的背包問題

CSES Coin Combinations I

你有面額為 c_1, c_2, \dots, c_n 的硬幣，求湊出 x 元的方案數量， $[1, 2, 3]$ 、 $[1, 3, 2]$ 算是兩種 ($n \leq 100, x, c_i \leq 10^6$)

- 狀態應該很明顯： dp_i 為湊出 i 元的方法數
- 轉移式： $dp_i = \begin{cases} 1 & \text{if } i = 0 \\ \sum_{j=1}^n dp_{i-c_j} & \text{otherwise} \end{cases}$
- Trivial la!

CSES Coin Combinations II

你有面額為 c_1, c_2, \dots, c_n 的硬幣，求湊出 x 元的方案數量， $[1, 2, 3]$ 、 $[1, 3, 2]$ 算是同一種 ($n \leq 100, x, c_i \leq 10^6$)

- 多了排列算同一種的限制該怎麼辦？

跟排列組合有關的背包問題

CSES Coin Combinations II

你有面額為 c_1, c_2, \dots, c_n 的硬幣，求湊出 x 元的方案數量， $[1, 2, 3]$ 、 $[1, 3, 2]$ 算是同一種 ($n \leq 100, x, c_i \leq 10^6$)

- 多了排列算同一種的限制該怎麼辦？
- 我們觀察一下原本的轉移式會有甚麼問題

CSES Coin Combinations II

你有面額為 c_1, c_2, \dots, c_n 的硬幣，求湊出 x 元的方案數量， $[1, 2, 3]$ 、 $[1, 3, 2]$ 算是同一種 ($n \leq 100, x, c_i \leq 10^6$)

- 多了排列算同一種的限制該怎麼辦？
- 我們觀察一下原本的轉移式會有甚麼問題
- 如果外層迴圈是 $1 \sim x$ (價值)，內層迴圈為 $1 \sim n$ (面額)，那麼就會發生重複計算的問題，如上所述

CSES Coin Combinations II

你有面額為 c_1, c_2, \dots, c_n 的硬幣，求湊出 x 元的方案數量， $[1, 2, 3]$ 、 $[1, 3, 2]$ 算是同一種 ($n \leq 100, x, c_i \leq 10^6$)

- 多了排列算同一種的限制該怎麼辦？
- 我們觀察一下原本的轉移式會有甚麼問題
- 如果外層迴圈是 $1 \sim x$ (價值)，內層迴圈為 $1 \sim n$ (面額)，那麼就會發生重複計算的問題，如上所述
- 如何解決？簡單，將硬幣面額的順序固定

跟排列組合有關的背包問題

CSES Coin Combinations II

你有面額為 c_1, c_2, \dots, c_n 的硬幣，求湊出 x 元的方案數量， $[1, 2, 3]$ 、 $[1, 3, 2]$ 算是同一種 ($n \leq 100, x, c_i \leq 10^6$)

- 多了排列算同一種的限制該怎麼辦？
- 我們觀察一下原本的轉移式會有甚麼問題
- 如果外層迴圈是 $1 \sim x$ (價值)，內層迴圈為 $1 \sim n$ (面額)，那麼就會發生重複計算的問題，如上所述
- 如何解決？簡單，將硬幣面額的順序固定
- 因此我們只需要將兩層迴圈替換就可以了！

例題

AtCoder DP Contest D - Knapsack 1

有 N 種物品，每種物品的重量為 w_i ，價值為 v_i ，背包的容量為 W ，求背包裡的物品的最大價值

($N \leq 100, W \leq 10^5, w_i \leq W, v_i \leq 10^9$)

AtCoder DP Contest E - Knapsack 2

有 N 種物品，每種物品的重量為 w_i ，價值為 v_i ，背包的容量為 W ，求背包裡的物品的最小重量

($N \leq 100, W \leq 10^9, w_i \leq W, v_i \leq 10^3$)

Minimizing Coins

硬幣問題，有無限個面額為 c_1, c_2, \dots, c_n 的硬幣，求湊出 x 元的最少硬幣數量

($n \leq 100, x, c_i \leq 10^6$)

例題

CSES Coin Combinations I

你有面額為 c_1, c_2, \dots, c_n 的硬幣，求湊出 x 元的方案數量， $[1, 2, 3]$ 、 $[1, 3, 2]$ 算是兩種 ($n \leq 100, x, c_i \leq 10^6$)

CSES Coin Combinations II

你有面額為 c_1, c_2, \dots, c_n 的硬幣，求湊出 x 元的方案數量， $[1, 2, 3]$ 、 $[1, 3, 2]$ 算是同一種 ($n \leq 100, x, c_i \leq 10^6$)

Book Shop

見原題

有限背包問題

總共有 n 種物品，每個物品有其數量 c_i 、重量 w_i 、價值 v_i ，背包的容量為 W ，求背包裡的物品的最大價值

$(n \leq 1000, c_i \leq 10^9, w_i \leq 100, W \leq 1000)$

- 注意物品數量不再是無限或是 0-1

有限背包問題

總共有 n 種物品，每個物品有其數量 c_i 、重量 w_i 、價值 v_i ，背包的容量為 W ，求背包裡的物品的最大價值

$(n \leq 1000, c_i \leq 10^9, w_i \leq 100, W \leq 1000)$

- 注意物品數量不再是無限或是 0-1
- 如果將每個物品都拆開來看的話，光是物品數量就會超過 10^9

有限背包問題

總共有 n 種物品，每個物品有其數量 c_i 、重量 w_i 、價值 v_i ，背包的容量為 W ，求背包裡的物品的最大價值

($n \leq 1000, c_i \leq 10^9, w_i \leq 100, W \leq 1000$)

- 注意物品數量不再是無限或是 0-1
- 如果將每個物品都拆開來看的話，光是物品數量就會超過 10^9
- 還記得二進位這東西嗎？我們只需要有 $2^0, 2^1, \dots, 2^n$ ，便可湊出 $0 \sim 2^{n+1} - 1$

有限背包問題

總共有 n 種物品，每個物品有其數量 c_i 、重量 w_i 、價值 v_i ，背包的容量為 W ，求背包裡的物品的最大價值

($n \leq 1000, c_i \leq 10^9, w_i \leq 100, W \leq 1000$)

- 注意物品數量不再是無限或是 0-1
- 如果將每個物品都拆開來看的話，光是物品數量就會超過 10^9
- 還記得二進位這東西嗎？我們只需要有 $2^0, 2^1, \dots, 2^n$ ，便可湊出 $0 \sim 2^{n+1} - 1$
- 在這裡也同理！我們將 c_i 拆成 $2^0, 2^1, \dots$ ，就可以將物品數量變為 $\log c_i$ 了！

有限背包問題

總共有 n 種物品，每個物品有其數量 c_i 、重量 w_i 、價值 v_i ，背包的容量為 W ，求背包裡的物品的最大價值

($n \leq 1000, c_i \leq 10^9, w_i \leq 100, W \leq 1000$)

- 注意物品數量不再是無限或是 0-1
- 如果將每個物品都拆開來看的話，光是物品數量就會超過 10^9
- 還記得二進位這東西嗎？我們只需要有 $2^0, 2^1, \dots, 2^n$ ，便可湊出 $0 \sim 2^{n+1} - 1$
- 在這裡也同理！我們將 c_i 拆成 $2^0, 2^1, \dots$ ，就可以將物品數量變為 $\log c_i$ 了！
- 最後，再將這些拆好的物品，做 0-1 背包問題即可，時間複雜度 $nW \log c_i$

有限背包問題

總共有 n 種物品，每個物品有其數量 c_i 、重量 w_i 、價值 v_i ，背包的容量為 W ，求背包裡的物品的最大價值

($n \leq 1000, c_i \leq 10^9, w_i \leq 100, W \leq 1000$)

- 注意物品數量不再是無限或是 0-1
- 如果將每個物品都拆開來看的話，光是物品數量就會超過 10^9
- 還記得二進位這東西嗎？我們只需要有 $2^0, 2^1, \dots, 2^n$ ，便可湊出 $0 \sim 2^{n+1} - 1$
- 在這裡也同理！我們將 c_i 拆成 $2^0, 2^1, \dots$ ，就可以將物品數量變為 $\log c_i$ 了！
- 最後，再將這些拆好的物品，做 0-1 背包問題即可，時間複雜度 $nW \log c_i$
- 之後如果你們有機會學到 DP 優化，會再將這個做法優化到更快

更多例題

- Array Description
- Counting Towers
- CF 1526C1. Potions (Easy Version)

子序列 DP

- **Subsequence** 子序列：從一個字串中挑出幾個字元組成的字串，前後相對順序不變，如： abc 的子序列為 a, b, c, ab, ac, bc, abc
- **Substring** 子字串：從一個字串中挑出某個區間的字元組成的字串，如： abc 的子字串為 a, b, c, ab, bc, abc

- LCS : Longest Common Subsequence , 最長共同子序列

- LCS : Longest Common Subsequence , 最長共同子序列
- 給定兩字串 s_1, s_2 , 求一個最長的字串長度, 使得該字串為 s_1, s_2 的子序列

- 子序列 DP 的轉移式算是比較特別的

- 子序列 DP 的轉移式算是比較特別的
- $dp_{i,j}$: s_1 的前 i 個元素與 s_2 的前 j 個元素的 LCS 長度

- 子序列 DP 的轉移式算是比較特別的
- $dp_{i,j}$: s_1 的前 i 個元素與 s_2 的前 j 個元素的 LCS 長度
- 怎麼轉移呢？可以觀察到， $s_{1,i}$ 與 $s_{2,j}$ 只有兩種關係：一樣 or 不一樣

- 我們先來看 $s_{1,i} = s_{2,j}$ 的情況

- 我們先來看 $s_{1,i} = s_{2,j}$ 的情況
- 假設 $s_{1,i} = s_{2,j}$ ，那麼以 $s_{1,i}$ 為結尾的某個共同子序列，去掉結尾之後，就會變成 s_1 的前 $i - 1$ 個元素與 s_2 的前 $j - 1$ 個元素的 LCS

- 我們先來看 $s_{1,i} = s_{2,j}$ 的情況
- 假設 $s_{1,i} = s_{2,j}$ ，那麼以 $s_{1,i}$ 為結尾的某個共同子序列，去掉結尾之後，就會變成 s_1 的前 $i - 1$ 個元素與 s_2 的前 $j - 1$ 個元素的 LCS
- 例如： $s_1 = \text{abcd}$ ， $s_2 = \text{acd}$ ，而 $i = 4, j = 3$ 時， $s_{1,4} = s_{2,3}$ ，因此以 d 結尾的 LCS 就會是“abc”、“ac”的 LCS 加上 d

- 我們先來看 $s_{1,i} = s_{2,j}$ 的情況
- 假設 $s_{1,i} = s_{2,j}$ ，那麼以 $s_{1,i}$ 為結尾的某個共同子序列，去掉結尾之後，就會變成 s_1 的前 $i - 1$ 個元素與 s_2 的前 $j - 1$ 個元素的 LCS
- 例如： $s_1 = \text{abcd}$ ， $s_2 = \text{acd}$ ，而 $i = 4, j = 3$ 時， $s_{1,4} = s_{2,3}$ ，因此以 d 結尾的 LCS 就會是“abc”、“ac”的 LCS 加上 d
- 發現這些性質之後，我們就可以推出在這樣的情況， $dp_{i,j} = dp_{i-1,j-1} + 1$ 了！

- 那假如不一樣呢？

- 那假如不一樣呢？
- 因為 $s_{1,i} \neq s_{2,j}$ ，所以 (i, j) 的 LCS 一定不會有 $s_{1,i}$ 或是 $s_{2,j}$

- 那假如不一樣呢？
- 因為 $s_{1,i} \neq s_{2,j}$ ，所以 (i,j) 的 LCS 一定不會有 $s_{1,i}$ 或是 $s_{2,j}$
- 這代表 i,j 都是沒用的！

- 那假如不一樣呢？
- 因為 $s_{1,i} \neq s_{2,j}$ ，所以 (i,j) 的 LCS 一定不會有 $s_{1,i}$ 或是 $s_{2,j}$
- 這代表 i,j 都是沒用的！
- 既然他沒用，那我們就隨便抓之前的狀態當作最佳解吧！

- 那假如不一樣呢？
- 因為 $s_{1,i} \neq s_{2,j}$ ，所以 (i, j) 的 LCS 一定不會有 $s_{1,i}$ 或是 $s_{2,j}$
- 這代表 i, j 都是沒用的！
- 既然他沒用，那我們就隨便抓之前的狀態當作最佳解吧！
- 在這個狀態下的轉移式： $dp_{i,j} = \max(dp_{i-1,j}, dp_{i,j-1})$

$$dp_{i,j} = \begin{cases} dp_{i-1,j-1} + 1 & \text{if } s_{1,i} = s_{2,j} \\ \max(dp_{i-1,j}, dp_{i,j-1}) & \text{otherwise} \end{cases}$$

- 我們可以先來看看動畫

- 我們可以先來看看動畫
- $s_{1,i} = s_{2,j}$ ：代表轉移點在 $(i - 1, j - 1)$
- 將答案 ans 加上 $s_{1,i}$ 、 $i - 1$ 、 $j - 1$

- 我們可以先來看看動畫
- $s_{1,i} = s_{2,j}$ ：代表轉移點在 $(i - 1, j - 1)$
- 將答案 ans 加上 $s_{1,i}$ 、 $i - 1$ 、 $j - 1$
- $s_{1,i} \neq s_{2,j}$ ：代表轉移點在 $(i - 1, j)$ 或是 $(i, j - 1)$
- 看哪個比較大，將 i, j 移至該點

- 我們可以先來看看動畫
- $s_{1,i} = s_{2,j}$ ：代表轉移點在 $(i - 1, j - 1)$
- 將答案 ans 加上 $s_{1,i}$ 、 $i - 1$ 、 $j - 1$
- $s_{1,i} \neq s_{2,j}$ ：代表轉移點在 $(i - 1, j)$ 或是 $(i, j - 1)$
- 看哪個比較大，將 i, j 移至該點
- 最後 ans 的逆序就是答案！

AtCoder DP Contest F. LCS

給兩字串，求 LCS

編輯距離

- 對於兩個字串 s_1, s_2 ，你有以下三種方法可以操作：
 - 刪除某個字元
 - 插入某個字元
 - 修改某個字元
- 求需要最少操作幾次，才能將 s_1 變成 s_2
- 操作次數稱為編輯距離

- abc 可由一次刪除變成 ac
- abc 可由一次插入變成 abdc
- abc 可由一次修改變成 abd

- 提示：這邊的狀態定義跟 LCS 一樣，轉移式也跟 LCS 有異曲同工之妙
- $dp_{i,j}$ 為 $s_{1,1} \dots s_{1,i}$ 跟 $s_{2,1} \dots s_{2,j}$ 的編輯距離
- 試想可以怎麼從 LCS 的定義轉換過來

- 提示：這邊的狀態定義跟 LCS 一樣，轉移式也跟 LCS 有異曲同工之妙
- $dp_{i,j}$ 為 $s_{1,1} \dots s_{1,i}$ 跟 $s_{2,1} \dots s_{2,j}$ 的編輯距離
- 試想可以怎麼從 LCS 的定義轉換過來
- $s_{1,i} = s_{2,j}$ ：顯然不需要在 (i, j) 做任何操作
- 轉移式： $dp_{i,j} = dp_{i-1,j-1}$

- 接著是不同的情況

- 接著是不同的情況
- 我們可以將 $s_{1,i}$ 刪除來得到 $s_{1,i-1}$
- 也就是說， (i, j) 可由一次編輯得到 $(i-1, j)$ 的狀態
- $dp_{i,j} = dp_{i-1,j} + 1$

- 如果要在 $s_{1,i}$ 後插入一個字元，你會選哪個？

轉移式 - 插入

- 如果要在 $s_{1,i}$ 後插入一個字元，你會選哪個？
- 顯然： $s_{2,j}$ ，這樣才有意義

- 如果要在 $s_{1,i}$ 後插入一個字元，你會選哪個？
- 顯然： $s_{2,j}$ ，這樣才有意義
- 既然你要為了 $s_{2,j}$ 再插入一個字元使其相等，那為何不乾脆刪掉 $s_{2,j}$ ？

- 如果要在 $s_{1,i}$ 後插入一個字元，你會選哪個？
- 顯然： $s_{2,j}$ ，這樣才有意義
- 既然你要為了 $s_{2,j}$ 再插入一個字元使其相等，那為何不乾脆刪掉 $s_{2,j}$ ？
- 所以刪除等價於插入，轉移式相同

- 修改後長度不變，但能夠滿足 $s_{1,i} = s_{2,i}$

- 修改後長度不變，但能夠滿足 $s_{1,i} = s_{2,i}$
- 而相等的情況我們剛剛討論過了，轉移點 (i, j) ，只是這次需要花費一次編輯

- 修改後長度不變，但能夠滿足 $s_{1,i} = s_{2,i}$
- 而相等的情況我們剛剛討論過了，轉移點 (i, j) ，只是這次需要花費一次編輯
- 轉移式： $dp_{i,j} = dp_{i-1,j-1} + 1$

- 最後，我們把三種情況的轉移式合併起來



$$dp_{i,j} = \begin{cases} dp_{i-1,j-1} & s_{1,i} = s_{2,j} \\ \min(dp_{i-1,j-1}, dp_{i-1,j}, dp_{i,j-1}) + 1 & \text{otherwise} \end{cases}$$

- 時間複雜度 $\mathcal{O}(n^2)$

CSES Edit Distance

編輯距離經典題

- 編輯距離看起來好像很廢？

- 編輯距離看起來好像很廢？
- 但他幫我完成了一份分數蠻高的探究與實作報告

- 編輯距離看起來好像很廢？
- 但他幫我完成了一份分數蠻高的探究與實作報告
- 事實上，編輯距離可用來計算兩個 DNA 的相似程度

- 編輯距離看起來好像很廢？
- 但他幫我完成了一份分數蠻高的探究與實作報告
- 事實上，編輯距離可用來計算兩個 DNA 的相似程度
- 如果你們有生物報告或是探究報告要做，可以參考一下（0

LIS

- Longest Increasing Subsequence，最長遞增子序列
- 跟 LCS 一樣，都是子序列問題
- 只是從“共同”的子序列，變成一個字串裡最長且元素呈現遞增 ($s_i \leq s_{i+1}$) 的子序列
- 例如 16723 的 LIS 就是 123

- 狀態定義： dp_i ：以第 i 個元素為結尾的 LIS

- 狀態定義： dp_i ：以第 i 個元素為結尾的 LIS
- 對於所有 $j < i$ ，如果 $s_j \leq s_i$ ，那就代表 s_i 可以接在 s_j 後面

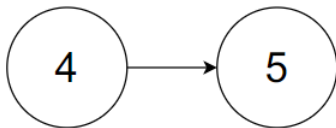
- 狀態定義： dp_i ：以第 i 個元素為結尾的 LIS
- 對於所有 $j < i$ ，如果 $s_j \leq s_i$ ，那就代表 s_i 可以接在 s_j 後面
- 因此 i 的轉移點就是對於所有 j ，滿足 $j < i, s_j \leq s_i$

- 狀態定義： dp_i ：以第 i 個元素為結尾的 LIS
- 對於所有 $j < i$ ，如果 $s_j \leq s_i$ ，那就代表 s_i 可以接在 s_j 後面
- 因此 i 的轉移點就是對於所有 j ，滿足 $j < i, s_j \leq s_i$
- 取最好的接上去就可以了！

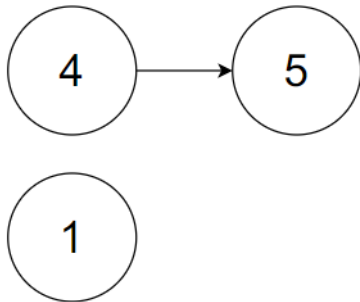
- 狀態定義： dp_i ：以第 i 個元素為結尾的 LIS
- 對於所有 $j < i$ ，如果 $s_j \leq s_i$ ，那就代表 s_i 可以接在 s_j 後面
- 因此 i 的轉移點就是對於所有 j ，滿足 $j < i, s_j \leq s_i$
- 取最好的接上去就可以了！
- $dp_i = \max_{j=1}^{i-1} (dp_j + 1), s_j \leq s_i$

- $\mathcal{O}(n^2)$ 實在是太遜了，能不能更快？

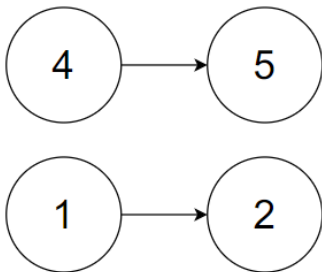
- $\mathcal{O}(n^2)$ 實在是太遜了，能不能更快？
- 遞增 \Rightarrow 單調性 \Rightarrow 能不能二分搜阿??
- 我們畫圖試試看，假設我們有 $\{4, 5, 1, 2, 3, 10, 7, 2\}$



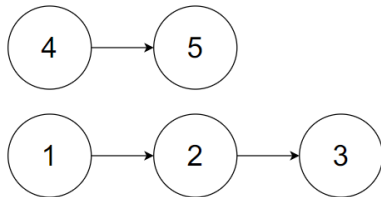
- 一開始 4, 5 都遞增，所以直接連起來



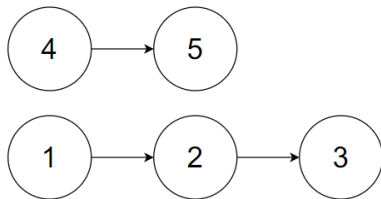
- 接下來的 1 比任何一個數字都還要小，因此我們先擺在旁邊



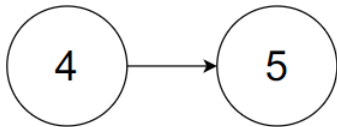
■ $2 > 1$ ，所以我們接在 1 後面



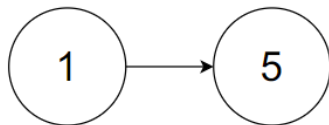
- $3 > 2$ ，所以接在 2 後面
- 可以發現，第二條鍊已經比第一條鍊長了，所以將第一條鍊捨棄
- 同樣位在第二位， $5 > 2$ ，顯然 2 的潛力比較高（畢竟可以接比較多東西）



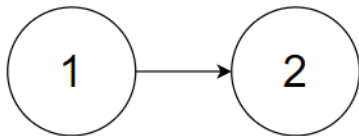
- 換句話說，如果在兩條鍊的同一位有兩數字 a, b ，且 $a > b$ ，那麼直接留下 b 而不是 a 肯定是最好的
- 也就是將數字大的直接淘汰
- 那我們重新試試看



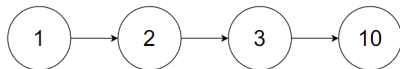
■ 這步驟一樣



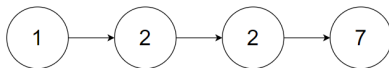
- 原本 1 應該是另一條鍊的第一項，但跟他並排的 $2 > 1$ ，潛力比較不好
- 所以我們把 2 捨棄，填上 1



■ 再把 5 用 2 替换掉



■ 將 3, 10 接上



- 依剛剛的規則，用 7, 2 將 10, 3 替換掉
- 最後得到的就是 LIS 長度了！

- 觀察一下規則可以發現，當我們加入新元素 A_i 時，我們可以在鍊裡找到一個元素 A_j 並將其取代（ A_j 滿足 $A_j \leq A_i$ 且 A_j 盡可能小）

- 觀察一下規則可以發現，當我們加入新元素 A_i 時，我們可以在鍊裡找到一個元素 A_j 並將其取代（ A_j 滿足 $A_j \leq A_i$ 且 A_j 盡可能小）
- 有沒有很像二分搜？

- 觀察一下規則可以發現，當我們加入新元素 A_i 時，我們可以在鍊裡找到一個元素 A_j 並將其取代（ A_j 滿足 $A_j \leq A_i$ 且 A_j 盡可能小）
- 有沒有很像二分搜？
- 其實這就是在做 lower bound

- 觀察一下規則可以發現，當我們加入新元素 A_i 時，我們可以在鍊裡找到一個元素 A_j 並將其取代（ A_j 滿足 $A_j \leq A_i$ 且 A_j 盡可能小）
- 有沒有很像二分搜？
- 其實這就是在做 lower bound
- 每次找到一個元素取代，若沒元素能夠取代就在鍊的尾端接上

- 觀察一下規則可以發現，當我們加入新元素 A_i 時，我們可以在鍊裡找到一個元素 A_j 並將其取代（ A_j 滿足 $A_j \leq A_i$ 且 A_j 盡可能小）
- 有沒有很像二分搜？
- 其實這就是在做 lower bound
- 每次找到一個元素取代，若沒元素能夠取代就在鍊的尾端接上
- 時間複雜度 $\mathcal{O}(n \log n)$

- 應該有人有疑問：假設目前鍊長 4，我替換掉了位置 2，阿 3,4 又沒辦法接在 2 後面，怎麼會合法？

- 應該有人有疑問：假設目前鍊長 4，我替換掉了位置 2，阿 3,4 又沒辦法接在 2 後面，怎麼會合法？
- 這是因為這個鍊其實不是真正的 LIS，只是紀錄各種 IS 在同一位置上的最佳解罷了

- 應該有人有疑問：假設目前鍊長 4，我替換掉了位置 2，阿 3,4 又沒辦法接在 2 後面，怎麼會合法？
- 這是因為這個鍊其實不是真正的 LIS，只是紀錄各種 IS 在同一位置上的最佳解罷了
- 你可以把他想像成是在“新陳代謝”

- 前面都是在講最大長度，沒有講構造出的答案

- 前面都是在講最大長度，沒有講構造出的答案
- DP 問題中，一個非常關鍵的點就是目前狀態的轉移點是哪一個

- 前面都是在講最大長度，沒有講構造出的答案
- DP 問題中，一個非常關鍵的點就是目前狀態的轉移點是哪一個
- 我們可以對每個狀態紀錄他是由哪個轉移點轉移得來的
- 最後再從最後一個一直往前推，就能夠找到答案了！
- 這部分就留給學員回家實作了

CSES Increasing Subsequence

LIS 經典題目

APCS 202101 4. 飛黃騰達

見原題

2021 TOIP pC

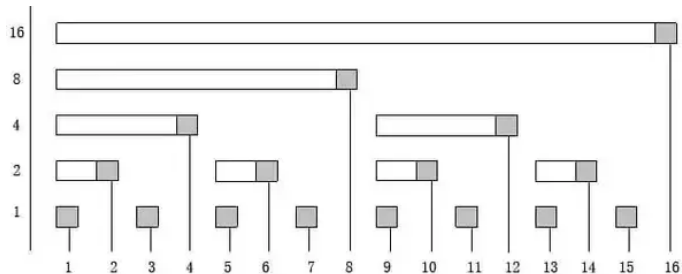
見原題

- Binary Indexed tree, 又稱 Fenwick Tree
- 可以說是簡化版的 Segment Tree

- 首先，我們要知道什麼是 `lowbit`
- `lowbit` 指的是數字在二進位下，最右邊的 1 代表的數字
- 例如 $5 = 101_{(2)}$, $lowbit(5) = 1$ 、 $6 = 110_{(2)}$, $lowbit(6) = 2$
- 在程式上可以用 $x \& (-x)$ 算出
- 因為 $-x$ 就是 x 的補數 +1
- $(56)_{10} = (111000)_2$, $(-56)_{10} = (001000)_2$

BIT

- 接著來看 BIT 的定義
- $\text{BIT}[i]$ 代表的是 $[i - \text{lowbit}(i) + 1, i]$ 的區間
- 也就是說， $\text{BIT}[i]$ 代表的就是長度為 $\text{lowbit}(i)$ 的區間



- 如果我們要更改 A_i 的值，那就需要更改所有包含 i 的陣列
- 觀察之後會發現，從 i 開始，每次更改後將 i 加上 $lowbit(i)$
- 經過的點就是包含 i 的所有區間

- 至於查詢 $1 \sim i$ 的和，則是要避免有重疊的線段
- 觀察後，會發現其實就是不斷 $-lowbit(i)$
- OK！我們會 BIT 了

先來個簡單的

CSES Dynamic Range Sum Queries

請寫出一支程式，支援以下操作：

- `update(i, x)`：將 A_i 加上 x
- `query(l, r)`：查詢 A_l, A_{l+1}, \dots, A_r 的總和

- BIT 也可以拿來計算最大值

- BIT 也可以拿來計算最大值
- 我們將 BIT 的區間定義成以該區間內的數字為結尾的 LIS 長度

- BIT 也可以拿來計算最大值
- 我們將 BIT 的區間定義成以該區間內的數字為結尾的 LIS 長度
- 也就是 $\text{query}(i)$ 會回傳以 $1 \sim i$ 為結尾的最大 LIS 長度

- BIT 也可以拿來計算最大值
- 我們將 BIT 的區間定義成以該區間內的數字為結尾的 LIS 長度
- 也就是 $\text{query}(i)$ 會回傳以 $1 \sim i$ 為結尾的最大 LIS 長度
- 假設這是 tmp ，那我們在 tmp 之後就能再接上 i ，使得 LIS 長度加一

- BIT 也可以拿來計算最大值
- 我們將 BIT 的區間定義成以該區間內的數字為結尾的 LIS 長度
- 也就是 `query(i)` 會回傳以 $1 \sim i$ 為結尾的最大 LIS 長度
- 假設這是 `tmp`，那我們在 `tmp` 之後就能再接上 i ，使得 LIS 長度加一
- 如此一來，我們就可以使用 BIT 來計算 LIS 了！

1. 對於每個數字 a_i ，查詢 $\text{tmp} = \text{query}(a_i - 1)$
2. $\text{update}(a_i, \text{tmp} + 1)$
3. 最後 $\text{query}(\text{夠大的數字})$ 就是答案！

TI0J 1080 A. 逆序數對

計算符合以下條件的數對數量： $i < j, a_i > a_j$

- 這題其實是分治的題目

TI0J 1080 A. 逆序數對

計算符合以下條件的數對數量： $i < j, a_i > a_j$

- 這題其實是分治的題目
- 但我們可以很開心的用 BIT 解決

TI0J 1080 A. 逆序數對

計算符合以下條件的數對數量： $i < j, a_i > a_j$

- 這題其實是分治的題目
- 但我們可以很開心的用 BIT 解決
- 將 query 設定為數字 $1 \sim i$ 出現的次數

TI0J 1080 A. 逆序數對

計算符合以下條件的數對數量： $i < j, a_i > a_j$

- 這題其實是分治的題目
- 但我們可以很開心的用 BIT 解決
- 將 query 設定為數字 $1 \sim i$ 出現的次數
- 對於某個數字 a_j ， $a_i > a_j$ 的數量就是 $n - \text{query}(a_j)$

DAG DP

- 不確定圖論有沒有講過
- DAG：有向無環圖
- 能夠拓撲排序的就是 DAG

- 回想一下第一堂 DP 課，講 Bottom Up 的地方
- 有提到“ 需要知道轉移點的前後順序”
- 有沒有覺得，這跟某種圖論技巧有關呢？

- 回想一下，拓樸排序的作用是甚麼？

Topo Sort

- 回想一下，拓樸排序的作用是甚麼？
- 構造出一個順序，使得所有邊都是由這個順序的前面指向後面

Topo Sort

- 回想一下，拓樸排序的作用是甚麼？
- 構造出一個順序，使得所有邊都是由這個順序的前面指向後面
- 其實這就跟轉移點的前後順序一樣！

- 回想一下，拓樸排序的作用是甚麼？
- 構造出一個順序，使得所有邊都是由這個順序的前面指向後面
- 其實這就跟轉移點的前後順序一樣！
- 將轉移點之間的關係畫成圖，迴圈的順序便是拓樸排序了

- 回想一下，拓樸排序的作用是甚麼？
- 構造出一個順序，使得所有邊都是由這個順序的前面指向後面
- 其實這就跟轉移點的前後順序一樣！
- 將轉移點之間的關係畫成圖，迴圈的順序便是拓樸排序了
- 有了一定的順序，就能夠拿來 DP

AtCoder DP Contest G - Longest Path

給 DAG，求出一條最長的路徑

- 首先，最長路徑有甚麼性質？

AtCoder DP Contest G - Longest Path

給 DAG，求出一條最長的路徑

- 首先，最長路徑有甚麼性質？
- 一定是入度為 0 的點開始，如何證明？

AtCoder DP Contest G - Longest Path

給 DAG，求出一條最長的路徑

- 首先，最長路徑有甚麼性質？
- 一定是入度為 0 的點開始，如何證明？
- 若最長路徑的起點 v 入度 $\neq 0$ ，那麼一定有一個點 u 能夠通到 v ，那 v 就不可能是起點了

AtCoder DP Contest G - Longest Path

給 DAG，求出一條最長的路徑

- 首先，最長路徑有甚麼性質？
- 一定是入度為 0 的點開始，如何證明？
- 若最長路徑的起點 v 入度 $\neq 0$ ，那麼一定有一個點 u 能夠通到 v ，那 v 就不可能是起點了
- 由反證法得證

AtCoder DP Contest G - Longest Path

給 DAG，求出一條最長的路徑

- 接著回到 DP

AtCoder DP Contest G - Longest Path

給 DAG，求出一條最長的路徑

- 接著回到 DP
- 狀態很好訂： dp_i ：以 i 為結尾的最大路徑長度

AtCoder DP Contest G - Longest Path

給 DAG，求出一條最長的路徑

- 接著回到 DP
- 狀態很好訂： dp_i ：以 i 為結尾的最大路徑長度
- 接著來找轉移點，應該也很好想，就是所有通向 i 的邊

AtCoder DP Contest G - Longest Path

給 DAG，求出一條最長的路徑

- 接著回到 DP
- 狀態很好訂： dp_i ：以 i 為結尾的最大路徑長度
- 接著來找轉移點，應該也很好想，就是所有通向 i 的邊
- 轉移式： $dp_i = \max(dp_j + 1)$ (j 表所有能連向 i 的邊)

AtCoder DP Contest G - Longest Path

給 DAG，求出一條最長的路徑

- 接著回到 DP
- 狀態很好訂： dp_i ：以 i 為結尾的最大路徑長度
- 接著來找轉移點，應該也很好想，就是所有通向 i 的邊
- 轉移式： $dp_i = \max(dp_j + 1)$ (j 表所有能連向 i 的邊)
- 最後，利用 Topo Sort 的順序依序轉移，最後取最大的 dp_i 就是答案！

AtCoder DP Contest G - Longest Path

給 DAG，求出一條最長的路徑

- 接著回到 DP
- 狀態很好訂： dp_i ：以 i 為結尾的最大路徑長度
- 接著來找轉移點，應該也很好想，就是所有通向 i 的邊
- 轉移式： $dp_i = \max(dp_j + 1)$ (j 表所有能連向 i 的邊)
- 最後，利用 Topo Sort 的順序依序轉移，最後取最大的 dp_i 就是答案！
- 其實這題也有只使用 DFS 的作法，大家可以想想看

CSES Longest Flight Route

跟 AtCoder DP Contest G 類似，但是要求出一組解

- 我們已經知道怎麼算長度了，那路徑怎麼算呢？

CSES Longest Flight Route

跟 AtCoder DP Contest G 類似，但是要求出一組解

- 我們已經知道怎麼算長度了，那路徑怎麼算呢？
- 還記得子序列 DP 的構造解嗎？
- 我們在子序列 DP 那邊會利用紀錄轉移點來得到構造解，在這裡也可以用！

CSES Longest Flight Route

跟 AtCoder DP Contest G 類似，但是要求出一組解

- 我們已經知道怎麼算長度了，那路徑怎麼算呢？
- 還記得子序列 DP 的構造解嗎？
- 我們在子序列 DP 那邊會利用紀錄轉移點來得到構造解，在這裡也可以用！
- pre_i : i 的轉移點

CSES Longest Flight Route

跟 AtCoder DP Contest G 類似，但是要求出一組解

- 我們已經知道怎麼算長度了，那路徑怎麼算呢？
- 還記得子序列 DP 的構造解嗎？
- 我們在子序列 DP 那邊會利用紀錄轉移點來得到構造解，在這裡也可以用！
- pre_i ： i 的轉移點
- 在拓撲排序的過程中更新 pre_i ，最後再把這些點連起來就是答案了

AtCoder DP Contest G - Longest Path

給 DAG，求出一條最長的路徑

CSES <https://cses.fi/problemset/task/1674/>

共有 n 人，第 1 人是老闆，其餘每個人都有一個上司，求每個人的所有下屬數量

CSES Longest Flight Route

跟 AtCoder DP Contest G 類似，但是要求出一組解

樹 DP

- 樹其實就是一種 DAG，有些樹 DP 也可以用 DAG 實作（如果樹是有向的），不過這邊我會主要以 DFS 的方式實作
- 複習一下樹的術語：
 - root：樹根，樹的最頂端
 - child：子節點，某個點往下一層的點
 - sub-tree：子樹，由子節點組成的樹
 - depth：深度，從 root 到某個點的距離

- 樹直徑：樹上最長的那條路徑

- 樹直徑：樹上最長的那條路徑
- 假設有一條路徑是以 i 為中心，往 i 的兩條子樹延伸

- 樹直徑：樹上最長的那條路徑
- 假設有一條路徑是以 i 為中心，往 i 的兩條子樹延伸
- 怎樣會最長？

- 樹直徑：樹上最長的那條路徑
- 假設有一條路徑是以 i 為中心，往 i 的兩條子樹延伸
- 怎樣會最長？
- 從 i 的子節點裡，找出能夠延伸到最長的兩個路徑

- 假設 dp_i 為以 i 為中心的最大長度

- 假設 dp_i 為以 i 為中心的最大長度
- 那我們會需要幾種東西：
 - dep_i : i 的深度
 - sub_i : i 的子樹中最深的點

- 假設 dp_i 為以 i 為中心的最大長度
- 那我們會需要幾種東西：
 - dep_i : i 的深度
 - sub_i : i 的子樹中最深的點
- 那麼 dp_i 怎麼算？

- 假設 dp_i 為以 i 為中心的最大長度
- 那我們會需要幾種東西：
 - dep_i : i 的深度
 - sub_i : i 的子樹中最深的點
- 那麼 dp_i 怎麼算？
- 假設 v 是 i 的子樹，而其中擁有最大 sub 的兩個點是 a, b ，那麼 $dp_i = sub_a + sub_b - 2 \cdot dep_i$

- 假設 dp_i 為以 i 為中心的最大長度
- 那我們會需要幾種東西：
 - dep_i : i 的深度
 - sub_i : i 的子樹中最深的點
- 那麼 dp_i 怎麼算？
- 假設 v 是 i 的子樹，而其中擁有最大 sub 的兩個點是 a, b ，那麼 $dp_i = sub_a + sub_b - 2 \cdot dep_i$
- 至於 sub_i 怎麼算呢？簡單，把 dep 當作 DFS 的回傳值，或是直接記錄在陣列裡，就可以收集到所有子樹的資料了！

CSES Tree Diameter

求樹直徑

TI0J <https://tioj.ck.tp.edu.tw/problems/1213>

求有權重的樹直徑

2022 TOIP B. 建設人工島

見原題

APCS 202007 P4. 病毒演化

有 n 種病毒，每個病毒由一個長度為 m 的 RNA 序列組成，包含 A、U、C、G、@ (@ 代表不確定)

除了原始病毒外，所有病毒都是由某個病毒演化而來的，求將 @ 填入某個字元後，每個病毒與它演化來源的病毒的距離總合最小值是多少？(距離指的是不一樣的位置數)

- 狀態可以怎麼訂？我們先將字元編號：AUCG@ 對應 01234 (後面會以 $s_{i,j} = 0/1/2/3/4$ 表示)

APCS 202007 P4. 病毒演化

有 n 種病毒，每個病毒由一個長度為 m 的 RNA 序列組成，包含 A、U、C、G、@ (@ 代表不確定)

除了原始病毒外，所有病毒都是由某個病毒演化而來的，求將 @ 填入某個字元後，每個病毒與它演化來源的病毒的距離總合最小值是多少？(距離指的是不一樣的位置數)

- 狀態可以怎麼訂？我們先將字元編號：AUCG@ 對應 01234 (後面會以 $s_{i,j} = 0/1/2/3/4$ 表示)
- $dp_{i,j,k}$ ：第 i 個病毒，第 j 個位置，第 k 種字元的最小距離

APCS 202007 P4. 病毒演化

有 n 種病毒，每個病毒由一個長度為 m 的 RNA 序列組成，包含 A、U、C、G、@ (@ 代表不確定)

除了原始病毒外，所有病毒都是由某個病毒演化而來的，求將 @ 填入某個字元後，每個病毒與它演化來源的病毒的距離總合最小值是多少？(距離指的是不一樣的位置數)

- 狀態可以怎麼訂？我們先將字元編號：AUCG@ 對應 01234 (後面會以 $s_{i,j} = 0/1/2/3/4$ 表示)
- $dp_{i,j,k}$ ：第 i 個病毒，第 j 個位置，第 k 種字元的最小距離
- 對於每個 RNA 序列，我們需要先做一些操作：

APCS 202007 P4. 病毒演化

有 n 種病毒，每個病毒由一個長度為 m 的 RNA 序列組成，包含 A、U、C、G、@ (@ 代表不確定)

除了原始病毒外，所有病毒都是由某個病毒演化而來的，求將 @ 填入某個字元後，每個病毒與它演化來源的病毒的距離總合最小值是多少？(距離指的是不一樣的位置數)

- 狀態可以怎麼訂？我們先將字元編號：AUCG@ 對應 01234 (後面會以 $s_{i,j} = 0/1/2/3/4$ 表示)
- $dp_{i,j,k}$ ：第 i 個病毒，第 j 個位置，第 k 種字元的最小距離
- 對於每個 RNA 序列，我們需要先做一些操作：
 - $$dp_{i,j,k} = \begin{cases} 0 & \text{if } s_{i,j} = k \text{ or } s_{i,j} = 4 \\ \infty & \text{otherwise} \end{cases}$$

APCS 202007 P4. 病毒演化

有 n 種病毒，每個病毒由一個長度為 m 的 RNA 序列組成，包含 A、U、C、G、@ (@ 代表不確定)

除了原始病毒外，所有病毒都是由某個病毒演化而來的，求將 @ 填入某個字元後，每個病毒與它演化來源的病毒的距離總合最小值是多少？(距離指的是不一樣的位置數)

■ 至於轉移式怎麼訂呢？

APCS 202007 P4. 病毒演化

有 n 種病毒，每個病毒由一個長度為 m 的 RNA 序列組成，包含 A、U、C、G、@ (@ 代表不確定)

除了原始病毒外，所有病毒都是由某個病毒演化而來的，求將 @ 填入某個字元後，每個病毒與它演化來源的病毒的距離總合最小值是多少？(距離指的是不一樣的位置數)

- 至於轉移式怎麼訂呢？
- 對於轉移點 v ，我們枚舉 $k, l = 0 \sim 4$ ，如果 $k \neq l$ 就代表要 $+1$

APCS 202007 P4. 病毒演化

有 n 種病毒，每個病毒由一個長度為 m 的 RNA 序列組成，包含 A、U、C、G、@ (@ 代表不確定)

除了原始病毒外，所有病毒都是由某個病毒演化而來的，求將 @ 填入某個字元後，每個病毒與它演化來源的病毒的距離總合最小值是多少？(距離指的是不一樣的位置數)

- 至於轉移式怎麼訂呢？
- 對於轉移點 v ，我們枚舉 $k, l = 0 \sim 4$ ，如果 $k \neq l$ 就代表要 $+1$
- 最終轉移式：
$$dp_{i,j,k} = \sum \min_{l=0}^4 (dp_{v,j,l} + (k \neq l))$$

APCS 202007 P4. 病毒演化

有 n 種病毒，每個病毒由一個長度為 m 的 RNA 序列組成，包含 A、U、C、G、@ (@ 代表不確定)

除了原始病毒外，所有病毒都是由某個病毒演化而來的，求將 @ 填入某個字元後，每個病毒與它演化來源的病毒的距離總合最小值是多少？(距離指的是不一樣的位置數)

- CSES Tree Matching
- CF 1528A. Parsa's Humongous Tree