

動態規劃 (二)

sam571128

2022-07-06

- DP 的概念
- $O(n \log n)$ LIS
- 各種背包問題
- 區間 DP (Range DP)
- 位元 DP (Bitmask DP)
- 單調隊列優化 (Monotonic Queue Optimization)
- 矩陣快速冪 (Matrix Exponentiation)
- 更多例題

DP 的概念

這堂課，我們要來更加地了解 DP，以下為解決 DP 問題時會用到的一些性質

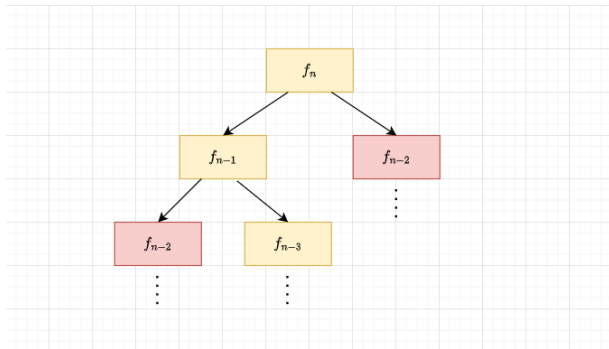
- 重複子問題 (overlapping subproblems)
- 最佳子結構 (optimal substructures)
- 狀態的轉移順序會是一張有向無環圖 (DAG)

重複子問題 (overlapping subproblems)

- 一個問題，可以被拆分成很多個小問題，而這些小問題在遞迴時，可能會被重複使用到很多次，而非每次皆會產生一個新的問題。

重複子問題 (overlapping subproblems)

- 一個問題，可以被拆分成很多個小問題，而這些小問題在遞迴時，可能會被重複使用到很多次，而非每次皆會產生一個新的問題。
- 例子: 費氏數列 ($f_n = f_{n-1} + f_{n-2}$)



重複子問題 (overlapping subproblems)

- 一個問題，可以被拆分成很多個小問題，而這些小問題在遞迴時，可能會被重複使用到很多次，而非每次皆會產生一個新的問題。
- 例子: 費氏數列 ($f_n = f_{n-1} + f_{n-2}$)
- 可以使用動態規劃紀錄狀態，記憶化 (memoization) 就是其中一種例子
- 左邊的 code 為 $O(f_n) \approx O(2^n)$ ，而右邊的 code 為 $O(n)$

```
int f(int x){  
    if(x <= 1)  
        return 1;  
    else  
        return f(x-1) + f(x-2);  
}
```

```
int f(int x){  
    if(dp[x]) return dp[x];  
    if(x <= 1)  
        return dp[x] = 1;  
    return dp[x] = f(x-1) + f(x-2);  
}
```

最佳子結構 (optimal substructures)

- 對於某個狀態的最佳解，可以從小狀態的最佳解轉移過來

最佳子結構 (optimal substructures)

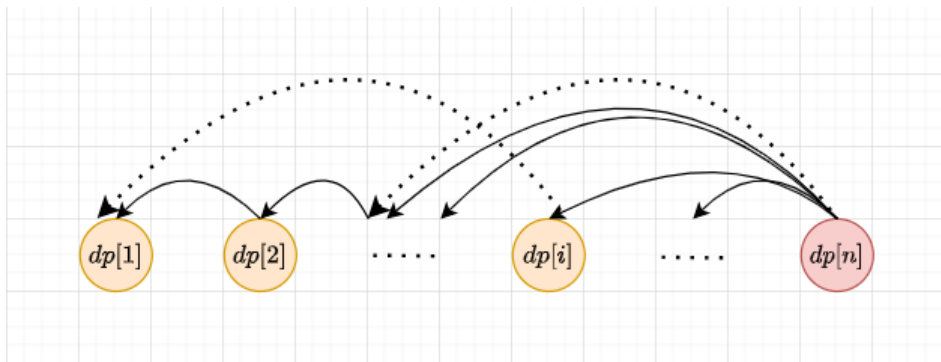
- 對於某個狀態的最佳解，可以從小狀態的最佳解轉移過來
- DP 的轉移式通常會有 $dp[i]$ 表示前 i 個 ... 的最佳解
- 而轉移式也通常以類似的方式去思考並且轉移而來

最佳子結構 (optimal substructures)

- 對於某個狀態的最佳解，可以從小狀態的最佳解轉移過來
- DP 的轉移式通常會有 $dp[i]$ 表示前 i 個 ... 的最佳解
- 而轉移式也通常以類似的方式去思考並且轉移而來
- 題外話: 貪心的題目通常也會滿足這個性質

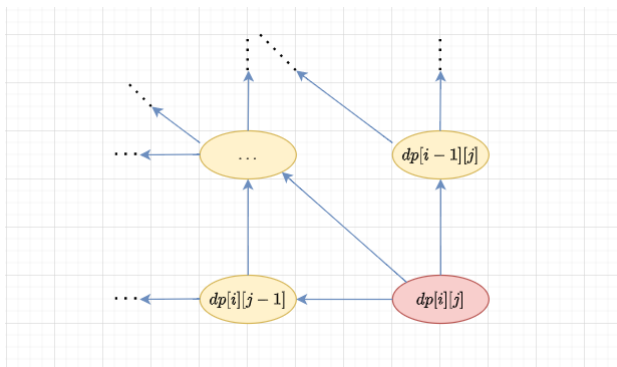
DP 的轉移順序

- 轉移順序必須是一張 DAG (有向無環圖)
- 不能夠發生 $f(b)$ 從 $f(a)$ 轉移，卻又讓 $f(a)$ 從 $f(b)$ 轉移的情形
- 下圖為一個線性 DP 可能的轉移順序



DP 的轉移順序

- 轉移順序必須是一張 DAG (有向無環圖)
- 不能夠發生 $f(b)$ 從 $f(a)$ 轉移，卻又讓 $f(a)$ 從 $f(b)$ 轉移的情形
- 下圖為一個二維 DP 可能的轉移順序



DP 的轉移順序

- 轉移順序必須是一張 DAG (有向無環圖)
- 不能夠發生 $f(b)$ 從 $f(a)$ 轉移，卻又讓 $f(a)$ 從 $f(b)$ 轉移的情形
- 這個概念等一下講到區間 DP (Range DP) 與位元 DP 時，會再次遇到

Longest Increasing Subsequence (最長遞增子序列)

Longest Increasing Subsequence (最長遞增子序列)

最長遞增子序列

你有一個 n 項的陣列 a_1, a_2, \dots, a_n ，請在這個陣列中找到最長遞增子序列的長度

最長遞增子序列: 找到一個集合 $\{p_1, p_2, \dots, p_k\}$, $1 \leq p_i \leq n$ ，使得 $a_{p_1} < a_{p_2} < \dots < a_{p_k}$ 且 k 是最大的。

在上一堂課，想必大家都已經學會這題如何在 $O(n^2)$ 的時間解決了!

Longest Increasing Subsequence (最長遞增子序列)

最長遞增子序列

你有一個 n 項的陣列 a_1, a_2, \dots, a_n ，請在這個陣列中找到最長遞增子序列的長度

最長遞增子序列: 找到一個集合 $\{p_1, p_2, \dots, p_k\}$, $1 \leq p_i \leq n$ ，使得 $a_{p_1} < a_{p_2} < \dots < a_{p_k}$ 且 k 是最大的。

假設 $dp[i]$ 為停在第 i 個元素時，最長遞增子序列的長度

Longest Increasing Subsequence (最長遞增子序列)

最長遞增子序列

你有一個 n 項的陣列 a_1, a_2, \dots, a_n ，請在這個陣列中找到最長遞增子序列的長度

最長遞增子序列: 找到一個集合 $\{p_1, p_2, \dots, p_k\}$, $1 \leq p_i \leq n$ ，使得 $a_{p_1} < a_{p_2} < \dots < a_{p_k}$ 且 k 是最大的。

假設 $dp[i]$ 為停在第 i 個元素時，最長遞增子序列的長度
那麼我們可以枚舉每一個元素 i 以及所有 $j < i$ ，轉移式為

$$dp[i] = \max_{1 \leq j < i, a_j < a_i} (dp[j] + 1)$$

Longest Increasing Subsequence (最長遞增子序列)

最長遞增子序列

你有一個 n 項的陣列 a_1, a_2, \dots, a_n ，請在這個陣列中找到最長遞增子序列的長度

最長遞增子序列: 找到一個集合 $\{p_1, p_2, \dots, p_k\}$, $1 \leq p_i \leq n$ ，使得 $a_{p_1} < a_{p_2} < \dots < a_{p_k}$ 且 k 是最大的。

假設 $dp[i]$ 為停在第 i 個元素時，最長遞增子序列的長度
那麼我們可以枚舉每一個元素 i 以及所有 $j < i$ ，轉移式為

$$dp[i] = \max_{1 \leq j < i, a_j < a_i} (dp[j] + 1)$$

時間複雜度即為 $O(n^2)$

Longest Increasing Subsequence (最長遞增子序列)

最長遞增子序列

你有一個 n 項的陣列 a_1, a_2, \dots, a_n ，請在這個陣列中找到最長遞增子序列的長度

最長遞增子序列: 找到一個集合 $\{p_1, p_2, \dots, p_k\}$, $1 \leq p_i \leq n$ ，使得 $a_{p_1} < a_{p_2} < \dots < a_{p_k}$ 且 k 是最大的。

事實上，這個題目有 $O(n \log n)$ 的作法，而這兩種分別是

1. 二分搜
2. 使用資料結構 (BIT、線段樹)

而第二種做法，明天會由 Colten 來教各位，我們來談談第一種方式

Longest Increasing Subsequence (最長遞增子序列)

以下為 DP 表格與原本的陣列

a_i	1	4	5	3	6	7	5	9
$dp[i]$	1	2	3	2	4	5	2	6

Longest Increasing Subsequence (最長遞增子序列)

以下為 DP 表格與原本的陣列

a_i	1	4	5	3	6	7	5	9
$dp[i]$	1	2	3	2	4	5	2	6

設一個 v 陣列，而 $v[j]$ 表示著當 $dp[i]$ 為 j 時， a_i 的最小值

j	1	2	3	4	5	6
$v[j]$	1	3	5	6	7	9

Longest Increasing Subsequence (最長遞增子序列)

以下為 DP 表格與原本的陣列

a_i	1	4	5	3	6	7	5	9
$dp[i]$	1	2	3	2	4	5	2	6

設一個 v 陣列，而 $v[j]$ 表示著當 $dp[i]$ 為 j 時， a_i 的最小值

j	1	2	3	4	5	6
$v[j]$	1	3	5	6	7	9

會發現 v 會是遞增的，我們可以一邊更新 v ，一邊二分搜尋找 $dp[i]$ 的答案

Longest Increasing Subsequence (最長遞增子序列)

程式碼如下，十分簡單: (複雜度: $O(n \log n)$)

```
int dp[MAXN], arr[MAXN];
vector<int> v;

for(int i = 1; i <= n; i++) {
    int idx = lower_bound(v.begin(), v.end(), arr[i]) - v.
        begin();
    dp[i] = idx + 1;
    if(idx == v.size()) v.push_back(arr[i]);
    else v[idx] = arr[i];
}

cout << v.size() << "\n";
```

APCS 2021 一月場 p4 - 飛黃騰達

有一隻企鵝 Gino 一開始停在座標 $(0, 0)$ 的位置，在每一次移動，他只能往上或往右走，而第一象限中，一共有 n 個果實，每個果實的位置在 (x_i, y_i) ，請問企鵝 Gino 最多可以吃到幾個果實？

APCS 2021 一月場 p4 - 飛黃騰達

有一隻企鵝 Gino 一開始停在座標 $(0, 0)$ 的位置，在每一次移動，他只能往上或往右走，而第一象限中，一共有 n 個果實，每個果實的位置在 (x_i, y_i) ，請問企鵝 Gino 最多可以吃到幾個果實？

我們將果實以 x 座標進行排序之後，只要對 y 座標找到 LIS 的長度，就是這題的答案了！

CSES - Increasing Subsequence

請找到給定陣列的最長遞增子序列。

TIOJ 1941 - 直升機抓寶 (Helicopter)

由於題目較難解釋，請至 TIOJ 查看

USACO Guide - LCS on Permutations

給你兩個 $1 \sim n$ 的排列，請找到這兩個排列的 LCS (最長共同子序列)

各種背包問題

背包問題種類

- 0/1 背包問題
- 無限背包問題
- 有限背包問題
- 混合背包問題 (同時出現很多種)
- 二維背包問題
- 分組背包問題
- 分數背包

0/1 背包問題

0/1 背包問題 (CSES - Book Shop)

你有一個容量為 C 的背包，有 n 個物品，每個物品的重量為 w_i ，每個物品可以拿一個或者不拿，請問最多可以拿多少物品？

0/1 背包問題

0/1 背包問題 (CSES - Book Shop)

你有一個容量為 C 的背包，有 n 個物品，每個物品的重量為 w_i ，每個物品可以拿一個或者不拿，請問最多可以拿多少物品？

0/1 背包問題的意思是指每個物品都可以拿 0 個或 1 個

0/1 背包問題

0/1 背包問題 (CSES - Book Shop)

你有一個容量為 C 的背包，有 n 個物品，每個物品的重量為 w_i ，每個物品可以拿一個或者不拿，請問最多可以拿多少物品？

這個問題其實跟之前的硬幣問題很像，也就是我們說過貪心不一定成立的那個問題

0/1 背包問題

0/1 背包問題 (CSES - Book Shop)

你有一個容量為 C 的背包，有 n 個物品，每個物品的重量為 w_i ，每個物品可以拿一個或者不拿，請問最多可以拿多少物品？

這個問題其實跟之前的硬幣問題很像，也就是我們說過貪心不一定成立的那個問題
那我們來講講這個問題的作法吧

0/1 背包問題

0/1 背包問題 (CSES - Book Shop)

你有一個容量為 C 的背包，有 n 個物品，每個物品的重量為 w_i ，每個物品可以拿一個或者不拿，請問最多可以拿多少物品？

我們設 $dp[i][j]$ 表示對於前 i 個物品湊出總重量為 j 的時候，最多可以拿幾個物品。

0/1 背包問題

0/1 背包問題 (CSES - Book Shop)

你有一個容量為 C 的背包，有 n 個物品，每個物品的重量為 w_i ，每個物品可以拿一個或者不拿，請問最多可以拿多少物品？

我們設 $dp[i][j]$ 表示對於前 i 個物品湊出總重量為 j 的時候，最多可以拿幾個物品。接著，我們分別枚舉那 n 個物品，則轉移式會是

$$dp[i][j] = \max(dp[i-1][j - w[i]] + 1)$$

程式碼大概可以寫成以下的樣子

```
for(int i = 1; i <= n; i++){  
    for(int j = 0; j <= C; j++){  
        if(j - w[i] >= 0){  
            dp[i][j] = max(dp[i][j], dp[i-1][j-w[i]] + 1);  
        }  
    }  
}
```

0/1 背包問題

不過，我們可以使用滾動 DP 的技巧，把第一個維度壓掉，時間複雜度: $O(nC)$

```
for(int i = 1; i <= n; i++){  
    for(int j = C; j >= 0; j--){  
        if(j-w[i] >= 0){  
            dp[j] = max(dp[j], dp[j-w[i]] + 1);  
        }  
    }  
}
```

注意! 第二個迴圈必須由 C 開始枚舉到 0，否則一個物品可能會多拿!

0/1 背包問題

題外話: 在演算法中有很多個名稱含有 0/1 的算法，大家要搞清楚每個的分別!

演算法名稱	0/1 的意義
0/1 背包問題	每個物品只能拿 1 個或 0 個
0/1 枚舉 (位元枚舉)	用二進位的方式進行枚舉
0/1 二分搜 (?)	我不知道，據說是 dreamoon 發明的，倍增法二分搜
0/1 BFS	圖的邊只有 0/1 時，用 BFS 在 $O(V + E)$ 找到最短路徑

無限背包問題

無限背包問題 (Coin Combinations II)

你有一個容量為 C 的背包，有 n 個物品，每個物品的重量為 w_i ，每個物品可以拿任意數量個，請問最多可以拿多少物品？

無限背包問題

無限背包問題 (Coin Combinations II)

你有一個容量為 C 的背包，有 n 個物品，每個物品的重量為 w_i ，每個物品可以拿任意數量個，請問最多可以拿多少物品？

無限背包問題的意思是指每個物品都可以拿任意數量個。

無限背包問題

無限背包問題 (Coin Combinations II)

你有一個容量為 C 的背包，有 n 個物品，每個物品的重量為 w_i ，每個物品可以拿任意數量個，請問最多可以拿多少物品？

DP 狀態的假設與 0/1 背包十分相似

無限背包問題

無限背包問題 (Coin Combinations II)

你有一個容量為 C 的背包，有 n 個物品，每個物品的重量為 w_i ，每個物品可以拿任意數量個，請問最多可以拿多少物品？

DP 狀態的假設與 0/1 背包十分相似

設 $dp[i][j]$ 表示對於前 i 個物品湊出總重量為 j 的時候，最多可以拿幾個物品。

無限背包問題

無限背包問題 (Coin Combinations II)

你有一個容量為 C 的背包，有 n 個物品，每個物品的重量為 w_i ，每個物品可以拿任意數量個，請問最多可以拿多少物品？

DP 狀態的假設與 0/1 背包十分相似

設 $dp[i][j]$ 表示對於前 i 個物品湊出總重量為 j 的時候，最多可以拿幾個物品。
接著，我們分別枚舉那 n 個物品，則轉移式會是

$$dp[i][j] = \max(dp[i-1][j - w[i]] + 1)$$

無限背包問題

無限背包問題 (Coin Combinations II)

你有一個容量為 C 的背包，有 n 個物品，每個物品的重量為 w_i ，每個物品可以拿任意數量個，請問最多可以拿多少物品？

DP 狀態的假設與 0/1 背包十分相似

設 $dp[i][j]$ 表示對於前 i 個物品湊出總重量為 j 的時候，最多可以拿幾個物品。
接著，我們分別枚舉那 n 個物品，則轉移式會是

$$dp[i][j] = \max(dp[i-1][j - w[i]] + 1)$$

欸？不是一模一樣嗎？

無限背包問題

無限背包問題與 0/1 背包問題的差別只在實作上! 以下是範例 code

```
for(int i = 1; i <= n; i++){
    for(int j = 0; j <= C; j++){
        dp[i][j] = dp[i-1][j];
        if(j-w[i] >= 0){
            dp[i][j] = max(dp[i][j], dp[i][j-w[i]] + 1);
        }
    }
}
```

無限背包問題

同樣可以使用滾動 DP 壓掉一個維度，時間複雜度: $O(nC)$

```
for(int i = 1; i <= n; i++){  
    for(int j = 0; j <= C; j++){  
        if(j - w[i] >= 0){  
            dp[j] = max(dp[j], dp[j - w[i]] + 1);  
        }  
    }  
}
```

有限背包問題

有限背包問題 (CSES - Book Shop II)

你有一個容量為 C 的背包，有 n 個物品，每個物品的重量為 w_i ，每個物品的數量為 a_i 個，請問最多可以拿多少物品？

基本上轉移式跟前兩個也是一模一樣，不過追加了物品數量的限制，我們一樣直接看看實作

有限背包問題

有限背包的程式碼 (滾動)

```
for(int i = 1; i <= n; i++){
    for(int x = 1; x <= a[i]; x++){
        for(int j = C; j >= 0; j--){
            if(j - w[i] >= 0){
                dp[j] = max(dp[j], dp[j - w[i]] + 1);
            }
        }
    }
}
```

有沒有發現什麼？

有限背包問題

有限背包的程式碼 (滾動)，時間複雜度 $O(\sum_{i=1}^n a_i C)$

```
for(int i = 1; i <= n; i++){
    for(int x = 1; x <= a[i]; x++){
        for(int j = C; j >= 0; j--){
            if(j-w[i] >= 0){
                dp[j] = max(dp[j], dp[j-w[i]] + 1);
            }
        }
    }
}
```

其實這份 code 就只是我們把 a_i 個物品想成是 a_i 個不同物品，做 0/1 背包

有限背包問題

有限背包的程式碼 (滾動)，時間複雜度 $O(\sum_{i=1}^n a_i C)$

```
for(int i = 1; i <= n; i++){
    for(int x = 1; x <= a[i]; x++){
        for(int j = C; j >= 0; j--){
            if(j-w[i] >= 0){
                dp[j] = max(dp[j], dp[j-w[i]] + 1);
            }
        }
    }
}
```

其實這份 code 就只是我們把 a_i 個物品想成是 a_i 個不同物品，做 0/1 背包 但是... 我們真的需要將他拆成那麼多物品嗎？

- 想想看一個概念，組出 $0 \sim n$ 的數字，我們最少需要多少數字呢？

有限背包問題 - 物品拆分

- 想想看一個概念，組出 $0 \sim n$ 的數字，我們最少需要多少數字呢？
- 真的需要 n 個 1 嗎？

有限背包問題 - 物品拆分

- 想想看一個概念，組出 $0 \sim n$ 的數字，我們最少需要多少數字呢？
- 真的需要 n 個 1 嗎？
- 二進位！

有限背包問題 - 物品拆分

我們可以將 a_i 拆成 $1、2、4、\dots、2^k$ 個、 $a_i - (2^{k+1} - 1)$ 個

而物品的數量就被我們從原本的 $\sum_{i=1}^n a_i$ ，變成了 $\sum_{i=1}^n \lg(a_i)$ 了!
時間複雜度: $O(n \lg(\max(a_i)) C)$

有限背包問題 - 還能更快嗎?

事實上，有限背包問題還有更快的方式，可以把 \log 給壓掉，不過那個要使用到這堂課後面會教的單調隊列優化。有興趣的可以自己查查看做法。

混合背包問題

現在，物品可能有無限多個，一個，或者 a_i 個

- 剛剛有提到無限背包和 0/1 背包的差別在迴圈的順序
- 同時，我們也講到，我們可以藉由物品拆分，將有限背包問題轉成 0/1 背包問題。
- 那們我們就在分不同的方式處理，無限背包自己處理，0/1 背包自己處理即可

混合背包問題

無限背包用這個

```
for(int j = 0; j <= C; j++){  
    if(j-w[i] >= 0){  
        dp[j] = max(dp[j], dp[j-w[i]] + 1);  
    }  
}
```

有限背包和 0/1 用這個

```
for(int j = C; j >= 0; j--){  
    if(j-w[i] >= 0){  
        dp[j] = max(dp[j], dp[j-w[i]] + 1);  
    }  
}
```


二維背包問題

二維背包問題

你有一個可以載重 M 且容量為 C 的背包，有 n 個物品，每個物品的重量為 w_i ，體積為 v_i ，每個物品可拿可不拿，請問最多可以拿多少物品？

除了重量以外，多了體積! 要怎麼處理呢?

二維背包問題

二維背包問題

你有一個可以載重 M 且容量為 C 的背包，有 n 個物品，每個物品的重量為 w_i ，體積為 v_i ，每個物品可拿可不拿，請問最多可以拿多少物品？

除了重量以外，多了體積！要怎麼處理呢？
狀態多開一維！

二維背包問題

二維背包問題

你有一個可以載重 M 且容量為 C 的背包，有 n 個物品，每個物品的重量為 w_i ，體積為 v_i ，每個物品可拿可不拿，請問最多可以拿多少物品？

設 $dp[i][j][k]$ 表示總重量為 j 且容量為 k 時，最多可以裝幾個物品。

轉移式為：

$$dp[i][j][k] = \max(dp[i-1][j-w[i]][k-v[i]] + 1)$$

二維背包問題

時間複雜度: $O(nMC)$ ，實作程式碼如下:

```
for(int i = 1; i <= n; i++){
    for(int j = M; j >= 0; j--){
        if(j-w[i] >= 0){
            for(int k = C; k >= 0; k--){
                dp[i][j][k] = max(dp[i][j][k], dp[i-1][j-w[i]
                    ][k-v[i]] + 1);
            }
        }
    }
}
```

分組背包問題

分組背包問題

你有一個容量為 C 的背包，一共有 t 組，每一組有 a_i 個物品，同一組最多只能選一個，請問最多可以拿多少物品？

有沒有人有什麼想法呢？

分組背包問題

時間複雜度: $O(nC \sum_{i=1}^t a_i)$ ，實作程式碼如下:

```
for(int i = 1; i <= t; i++){
    for(int j = M; j >= 0; j--){
        if(j-w[i] >= 0){
            for(int k = 0; k <= v[t].size(); k++){
                dp[j] = max(dp[j], dp[j-w[i]][k] + 1);
            }
        }
    }
}
```

分數背包問題

二維背包問題

你有一個可以容量為 C 的背包，有 n 個物品，每個物品的重量為 w_i ，價值為 v_i ，每個物品你可以拿 $0 \sim 1$ 個 (可以拿一部分)，最大可以拿到多少價值？

分數背包問題

二維背包問題

你有一個可以容量為 C 的背包，有 n 個物品，每個物品的重量為 w_i ，價值為 v_i ，每個物品你可以拿 $0 \sim 1$ 個 (可以拿一部分)，最大可以拿到多少價值？

這個其實不是 DP，直接 Greedy 拿取 CP 值 $(\frac{v_i}{w_i})$ 最大的即可

區間 DP (Range DP)

區間 DP (Range DP)

AtCoder DP Contest pN - Slimes

有 n 隻史萊姆排成一列，而每一次，你可以選擇相鄰的史萊姆，若兩隻史萊姆的大小為 a, b ，則他們會合併成一個小為 $a + b$ 的史萊姆，並消耗 $a + b$ 的能量。請找到讓這 n 隻史萊姆合併成一隻大史萊姆所需花費的最小能量。

區間 DP (Range DP)

AtCoder DP Contest pN - Slimes

有 n 隻史萊姆排成一行，而每一次，你可以選擇相鄰的史萊姆，若兩隻史萊姆的大小為 a, b ，則他們會合併成一個小為 $a + b$ 的史萊姆，並消耗 $a + b$ 的能量。請找到讓這 n 隻史萊姆合併成一隻大史萊姆所需花費的最小能量。

這題的想法與之前大家所寫過的不太一樣，他的狀態設計不再只是像以前的 $dp[i]$ 表示前 i 個合併後的最小能量了

區間 DP (Range DP)

AtCoder DP Contest pN - Slimes

有 n 隻史萊姆排成一行，而每一次，你可以選擇相鄰的史萊姆，若兩隻史萊姆的大小為 a, b ，則他們會合併成一個小為 $a + b$ 的史萊姆，並消耗 $a + b$ 的能量。請找到讓這 n 隻史萊姆合併成一隻大史萊姆所需花費的最小能量。

我們假設 $dp[l][r]$ 表示將整個區間 $[l, r]$ 的史萊姆合併之後，所需花費的最小能量。

區間 DP (Range DP)

AtCoder DP Contest pN - Slimes

有 n 隻史萊姆排成一列，而每一次，你可以選擇相鄰的史萊姆，若兩隻史萊姆的大小為 a, b ，則他們會合併成一個小為 $a + b$ 的史萊姆，並消耗 $a + b$ 的能量。請找到讓這 n 隻史萊姆合併成一隻大史萊姆所需花費的最小能量。

我們假設 $dp[l][r]$ 表示將整個區間 $[l, r]$ 的史萊姆合併之後，所需花費的最小能量。而轉移式會是

$$dp[l][r] = \max_{l \leq k < r} (dp[l][k] + dp[k+1][r] + \sum_{i=l}^r a_i)$$

邊界狀態為

$$dp[i][i] = 0$$

區間 DP (Range DP)

AtCoder DP Contest pN - Slimes

有 n 隻史萊姆排成一列，而每一次，你可以選擇相鄰的史萊姆，若兩隻史萊姆的大小為 a, b ，則他們會合併成一個小為 $a + b$ 的史萊姆，並消耗 $a + b$ 的能量。請找到讓這 n 隻史萊姆合併成一隻大史萊姆所需花費的最小能量。

不過這時，有個很重要的問題出現了！轉移的順序該是如何呢？

區間 DP (Range DP)

以下有兩種不同的轉移順序，我們來看看何者會是正確的

第一種:

```
for (int l = 1; l <= n; l++) {  
    for (int r = 1; r <= n; r++) {  
        for (int k = l; k <= r; k++) {  
            dp[l][r] = max(dp[l][r], dp[l][k] + dp[k+1][r] +  
                           sum(l,r));  
        }  
    }  
}
```

區間 DP (Range DP)

以下有兩種不同的轉移順序，我們來看看何者會是正確的

第二種:

```
for (int l = n; l >= 1; l--) {  
    for (int r = l; r <= n; r++) {  
        for (int k = l; k < r; k++) {  
            dp[l][r] = max(dp[l][r], dp[l][k] + dp[k+1][r] +  
                           sum(l,r));  
        }  
    }  
}
```


區間 DP (Range DP)

答案是第二種!

```
for (int l = n; l >= 1; l--) {  
    for (int r = l; r <= n; r++) {  
        for (int k = l; k < r; k++) {  
            dp[l][r] = max(dp[l][r], dp[l][k] + dp[k+1][r] +  
                           sum(l,r));  
        }  
    }  
}
```

區間 DP (Range DP)

- 第一種方式在轉移的時候會有很大的問題
- 我們可能還沒處理好小狀態，就直接去用小狀態計算大狀態的答案了
- 而這是我們不想要看到的

區間 DP (Range DP)

AtCoder DP Contest pN - Slimes

有 n 隻史萊姆排成一列，而每一次，你可以選擇相鄰的史萊姆，若兩隻史萊姆的大小為 a, b ，則他們會合併成一個小為 $a + b$ 的史萊姆，並消耗 $a + b$ 的能量。請找到讓這 n 隻史萊姆合併成一隻大史萊姆所需花費的最小能量。

而這題的時間複雜度為 $O(n^3)$ (使用前綴和計算區間和)

區間 DP (Range DP)

AtCoder DP Contest pL - Deque

Koying 和 Colten 在玩遊戲，他們在地上擺了 n 個石頭排成一列，並在上面用奇異筆寫上了數字。由 Koying 先手，他們每一次可以拿取最前面或最後面的石頭，並得到那顆石頭上面寫下的數字加入各自的分數中。兩個人都以最佳策略進行遊戲，請問最後兩人的分數分別會是多少？

區間 DP (Range DP)

AtCoder DP Contest pL - Deque

Koying 和 Colten 在玩遊戲，他們在地上擺了 n 個石頭排成一列，並在上面用奇異筆寫上了數字。由 Koying 先手，他們每一次可以拿取最前面或最後面的石頭，並得到那顆石頭上面寫下的數字加入各自的分數中。兩個人都以最佳策略進行遊戲，請問最後兩人的分數分別會是多少？

有了剛剛那題的經驗之後，這題我們留給大家一點時間進行思考

區間 DP (Range DP)

AtCoder DP Contest pL - Deque

Koying 和 Colten 在玩遊戲，他們在地上擺了 n 個石頭排成一列，並在上面用奇異筆寫上了數字。由 Koying 先手，他們每一次可以拿取最前面或最後面的石頭，並得到那顆石頭上面寫下的數字加入各自的分數中。兩個人都以最佳策略進行遊戲，請問最後兩人的分數分別會是多少？

假設 $dp[l][r]$ 為先手在區間 $[l, r]$ 時，能夠獲得的最大分數

區間 DP (Range DP)

AtCoder DP Contest pL - Deque

Koying 和 Colten 在玩遊戲，他們在地上擺了 n 個石頭排成一列，並在上面用奇異筆寫上了數字。由 Koying 先手，他們每一次可以拿取最前面或最後面的石頭，並得到那顆石頭上面寫下的數字加入各自的分數中。兩個人都以最佳策略進行遊戲，請問最後兩人的分數分別會是多少？

假設 $dp[l][r]$ 為先手在區間 $[l, r]$ 時，能夠獲得的最大分數
轉移式為

$$dp[l][r] = \max(a_l + sum(l, r) - dp[l+1][r], sum(l, r) - dp[l][r-1] + a_r)$$

區間 DP (Range DP)

AtCoder DP Contest pL - Deque

Koying 和 Colten 在玩遊戲，他們在地上擺了 n 個石頭排成一列，並在上面用奇異筆寫上了數字。由 Koying 先手，他們每一次可以拿取最前面或最後面的石頭，並得到那顆石頭上面寫下的數字加入各自的分數中。兩個人都以最佳策略進行遊戲，請問最後兩人的分數分別會是多少？

假設 $dp[l][r]$ 為先手在區間 $[l, r]$ 時，能夠獲得的最大分數
轉移式為

$$dp[l][r] = \max(a_l + sum(l, r) - dp[l+1][r], sum(l, r) - dp[l][r-1] + a_r)$$

邊界狀態為

$$dp[i][i] = a_i$$

區間 DP (Range DP)

Codeforces 607B - Zuma

給你一個 n 項的陣列 a_1, a_2, \dots, a_n ，你每次可以刪除一個回文子陣列，請問最少要刪除幾次，才能將整個陣列消除。

區間 DP (Range DP)

Codeforces 607B - Zuma

給你一個 n 項的陣列 a_1, a_2, \dots, a_n ，你每次可以刪除一個回文子陣列，請問最少要刪除幾次，才能將整個陣列消除。

同樣留給大家一點時間想想看

區間 DP (Range DP)

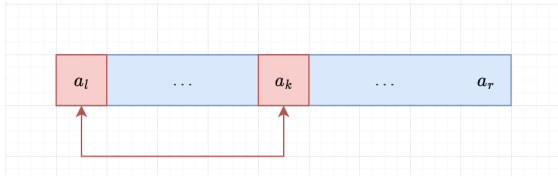
Codeforces 607B - Zuma

給你一個 n 項的陣列 a_1, a_2, \dots, a_n ，你每次可以刪除一個回文子陣列，請問最少要刪除幾次，才能將整個陣列消除。

這題的想法與前兩題差不多，假設 $dp[l][r]$ 為將 $[l, r]$ 消完所需的最少次數。
不過轉移式有兩種 case

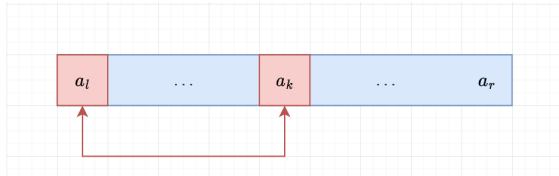
區間 DP (Range DP)

Case 1: $a_l = a_k$, 轉移 $dp[l+1][k-1] + dp[k+1][r]$



區間 DP (Range DP)

Case 1: $a_l = a_k$, 轉移 $dp[l+1][k-1] + dp[k+1][r]$

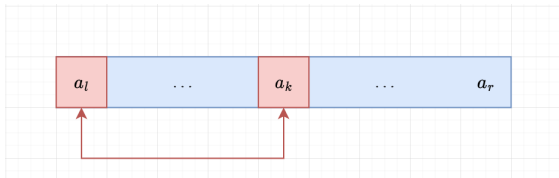


Case 2: 消除 a_l , 轉移 $1 + dp[l+1][r]$



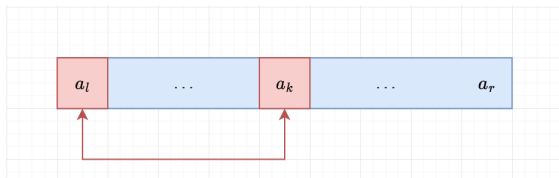
練習

Case 1: $a_l = a_k$, 轉移 $dp[l+1][k-1] + dp[k+1][r]$



練習

Case 1: $a_l = a_k$, 轉移 $dp[l+1][k-1] + dp[k+1][r]$



Case 2: 消除 a_l , 轉移 $1 + dp[l+1][r]$



位元 DP (Bitmask DP)

位元 DP (Bitmask DP)

在我們看位元 DP 之前，先幫大家複習一下位元運算

名稱	符號
and	&
or	
xor	
left shift	<<
right shift	>>

旅行推銷員問題 (Travelling Salesman Problem)

在某個國家，一共有 n 個城市，以及兩個城市之間的距離，現在有一個旅行推銷員，他希望從城市 1 開始出發，恰好經過所有城市一次之後，再回到城市 1。請問他最少要走過多少距離？

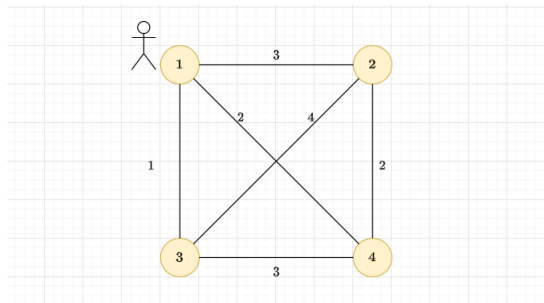
測資範圍: $1 \leq n \leq 20$

位元 DP (Bitmask DP)

旅行推銷員問題 (Travelling Salesman Problem)

在某個國家，一共有 n 個城市，以及兩個城市之間的距離，現在有一個旅行推銷員，他希望從城市 1 開始出發，恰好經過所有城市一次之後，再回到城市 1。請問他最少要走過多少距離？

測資範圍: $1 \leq n \leq 20$

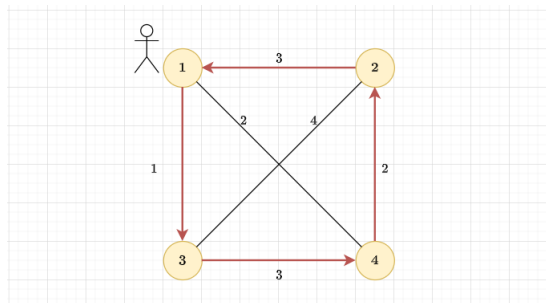


位元 DP (Bitmask DP)

旅行推銷員問題 (Travelling Salesman Problem)

在某個國家，一共有 n 個城市，以及兩個城市之間的距離，現在有一個旅行推銷員，他希望從城市 1 開始出發，恰好經過所有城市一次之後，再回到城市 1。請問他最少要走過多少距離？

測資範圍: $1 \leq n \leq 20$

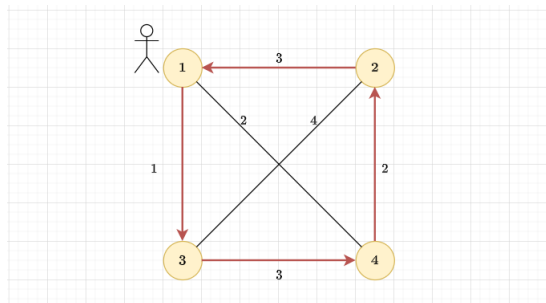


位元 DP (Bitmask DP)

旅行推銷員問題 (Travelling Salesman Problem)

在某個國家，一共有 n 個城市，以及兩個城市之間的距離，現在有一個旅行推銷員，他希望從城市 1 開始出發，恰好經過所有城市一次之後，再回到城市 1。請問他最少要走過多少距離？

測資範圍: $1 \leq n \leq 20$



旅行推銷員問題 (Travelling Salesman Problem)

在某個國家，一共有 n 個城市，以及兩個城市之間的距離，現在有一個旅行推銷員，他希望從城市 1 開始出發，恰好經過所有城市一次之後，再回到城市 1。請問他最少要走過多少距離？

測資範圍: $1 \leq n \leq 20$

這題的 DP 狀態的設計與大家之前看過的應該都不太一樣，因此我們直接來看看作法吧!

旅行推銷員問題 (Travelling Salesman Problem)

在某個國家，一共有 n 個城市，以及兩個城市之間的距離，現在有一個旅行推銷員，他希望從城市 1 開始出發，恰好經過所有城市一次之後，再回到城市 1。請問他最少要走過多少距離？

測資範圍: $1 \leq n \leq 20$

我們假設 $dp[i][mask]$ 為停在第 i 個城市， $mask$ 表示已經經過了幾個城市的最短距離。

旅行推銷員問題 (Travelling Salesman Problem)

在某個國家，一共有 n 個城市，以及兩個城市之間的距離，現在有一個旅行推銷員，他希望從城市 1 開始出發，恰好經過所有城市一次之後，再回到城市 1。請問他最少要走過多少距離？

測資範圍: $1 \leq n \leq 20$

我們假設 $dp[i][mask]$ 為停在第 i 個城市， $mask$ 表示已經經過了幾個城市的最短距離。
範例: $dp[1][0011]$ 表示停在第 1 個城市，已經走過了第 0 和 1 個城市

位元 DP (Bitmask DP)

旅行推銷員問題 (Travelling Salesman Problem)

在某個國家，一共有 n 個城市，以及兩個城市之間的距離，現在有一個旅行推銷員，他希望從城市 1 開始出發，恰好經過所有城市一次之後，再回到城市 1。請問他最少要走過多少距離？

測資範圍: $1 \leq n \leq 20$

轉移式的話:

$$dp[i][mask] = \max_{j \in adj[i]} (dp[j][mask2^i] + dis[j][i])$$

位元 DP (Bitmask DP)

旅行推銷員問題 (Travelling Salesman Problem)

在某個國家，一共有 n 個城市，以及兩個城市之間的距離，現在有一個旅行推銷員，他希望從城市 1 開始出發，恰好經過所有城市一次之後，再回到城市 1。請問他最少要走過多少距離？

測資範圍: $1 \leq n \leq 20$

轉移式的話:

$$dp[i][mask] = \max_{j \in adj[i]} (dp[j][mask2^i] + dis[j][i])$$

時間複雜度: $O(n2^n)$

位元 DP (Bitmask DP)

旅行推銷員問題 (Travelling Salesman Problem)

在某個國家，一共有 n 個城市，以及兩個城市之間的距離，現在有一個旅行推銷員，他希望從城市 1 開始出發，恰好經過所有城市一次之後，再回到城市 1。請問他最少要走過多少距離？

測資範圍: $1 \leq n \leq 20$

寫法如下: Code

位元 DP (Bitmask DP)

CSES - Elevator Rides

有 n 個人要搭電梯，第 i 個人的重量為 w_i ，而一班電梯只能載重 m kg 的重量，請問他們至少要搭幾次電梯才能載完所有人？

測資範圍: $1 \leq n \leq 20$

根據上一題的想法，有沒有人有狀態設計的想法呢？

位元 DP (Bitmask DP)

CSES - Elevator Rides

有 n 個人要搭電梯，第 i 個人的重量為 w_i ，而一班電梯只能載重 m kg 的重量，請問他們至少要搭幾次電梯才能載完所有人？

測資範圍: $1 \leq n \leq 20$

設 $dp[mask]$ 為已經搭了那些人時，搭的電梯數量與最後一個電梯的總重量。

舉例: $dp[101]$ 表示已經搭了第 0 和第 2 個人時的狀態。

位元 DP (Bitmask DP)

CSES - Elevator Rides

有 n 個人要搭電梯，第 i 個人的重量為 w_i ，而一班電梯只能載重 m kg 的重量，請問他們至少要搭幾次電梯才能載完所有人？

測資範圍: $1 \leq n \leq 20$

這題的轉移式由於比較難解釋，我們直接來看看程式碼：

Code

單調隊列優化 (Monotonic Queue Optimization)

單調隊列?

- 單調隊列是一個使用 Deque 或 Stack 維護的一種結構
- 最前面的元素會是最大或最小的元素
- 如果是最大的，整個隊列會是遞增的
- 反之，整個隊列會是遞減的
- 通常與 Sliding Window 一起使用

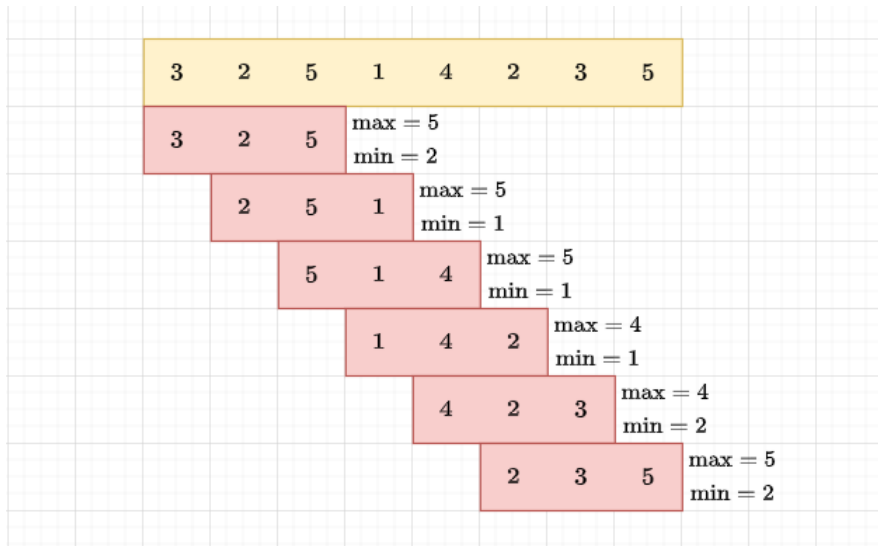
Sliding Maximum/Minimum (Zerojudge a146)

你有一個長度為 n 的陣列 a_1, \dots, a_n ，請找出所有長度為 k 的子陣列的最大和最小值。

測資範圍: $n \leq 10^6$

可能大家看這個不是很能理解，因此我們來看一下圖

單調隊列



Sliding Maximum/Minimum (Zerojudge a146)

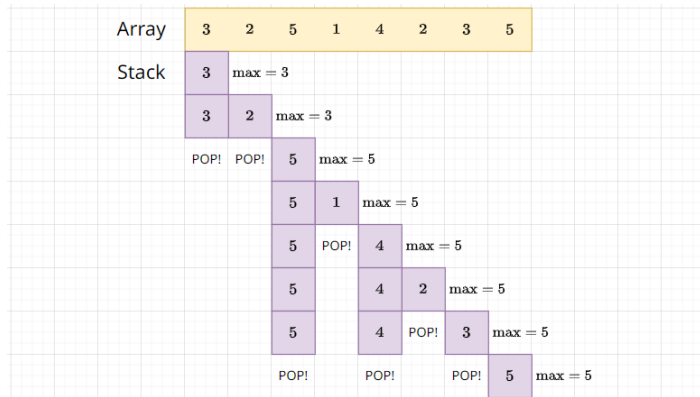
你有一個長度為 n 的陣列 a_1, \dots, a_n ，請找出所有長度為 k 的子陣列的最大和最小值。

測資範圍: $n \leq 10^6$

我們要怎麼做到這一點呢？此時，單調隊列可以幫助我們做到這一點！

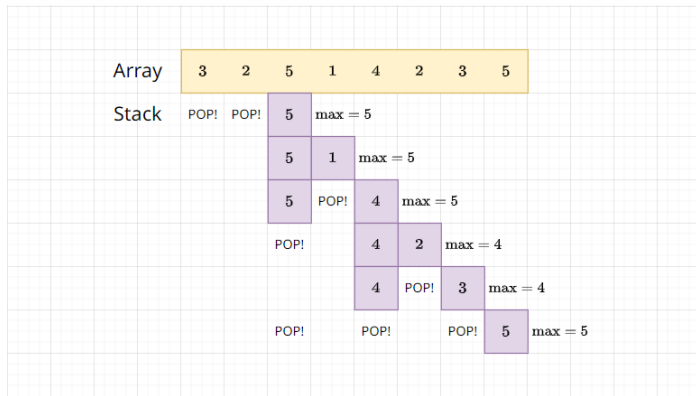
單調隊列

現在，我們想一個簡單一點的問題，我們對前綴找出維護最大值的單調隊列試試



單調隊列

用一樣的做法，不過長度超過 k 的也跟著 POP 掉!



只要對最大最小值都做一樣的事情，就可以得到固定長度的區間力。
時間複雜度: $O(n)$ ，比直接用 `set` 等資料結構還要快!

Zerojudge c528. 相隔小於一定距離最小總和子序列

給定一個長度為 N 的整數序列 a_1, a_2, \dots, a_N 及一個正整數 K ，請蓋掉任意個數字使得原序列中任意的連續 K 個數字都至少有一個數字被蓋掉了，請問蓋掉的數字的總和最小為多少？

Zerojudge c528. 相隔小於一定距離最小總和子序列

給定一個長度為 N 的整數序列 a_1, a_2, \dots, a_N 及一個正整數 K ，請蓋掉任意個數字使得原序列中任意的連續 K 個數字都至少有一個數字被蓋掉了，請問蓋掉的數字的總和最小為多少？

這題的 DP 式大家可以想一下，有想法的都可以提出來。

Zerojudge c528. 相隔小於一定距離最小總和子序列

給定一個長度為 N 的整數序列 a_1, a_2, \dots, a_N 及一個正整數 K ，請蓋掉任意個數字使得原序列中任意的連續 K 個數字都至少有一個數字被蓋掉了，請問蓋掉的數字的總和最小為多少？

設 $dp[i]$ 為遮掉第 i 個元素且前 i 個數字滿足題目條件時的最小總和。
則轉移式為

$$dp[i] = \min_{j=\max(0, i-K)}^{i-1} (dp[j] + a[i])$$

這個轉移式，我們可以很輕易地使用兩個迴圈，在 $O(NK)$ 的時間做完

Zerojudge c528. 相隔小於一定距離最小總和子序列

給定一個長度為 N 的整數序列 a_1, a_2, \dots, a_N 及一個正整數 K ，請蓋掉任意個數字使得原序列中任意的連續 K 個數字都至少有一個數字被蓋掉了，請問蓋掉的數字的總和最小為多少？

$$dp[i] = \min_{j=\max(0, i-K)}^{i-1} (dp[j]) + a[i]$$

不過，觀察到，其實我們只是想要找一段固定長度的區間的最小值！

單調隊列！時間複雜度： $O(n)$

矩陣快速冪

矩陣乘法!

在上禮拜的數學課，不知道大家有沒有把矩陣乘法這個東西學起來呢？

$$A_{n \times m} B_{m \times p} = \sum_{k=1}^m a_{ik} b_{kj}$$

The diagram illustrates the first element of the resulting matrix in a 2x2 multiplication. Matrix A is $\begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix}$ and matrix B is $\begin{bmatrix} e & f \\ g & h \end{bmatrix}$. A red horizontal line connects 'a' and 'b' in the first row of A, and a red vertical line connects 'e' and 'g' in the first column of B. The result is a 2x2 matrix $\begin{bmatrix} ae + bg & af + bh \\ ce + dg & cf + dh \end{bmatrix}$. The term 'ae + bg' in the top-left position of the result matrix is circled in red, indicating it is the result of the dot product of the first row of A and the first column of B.

矩陣乘法!

我們可以將矩陣寫成 struct，會像是以下這樣。乘法時間複雜度為 $O(nmp)$

```
const int MOD = 998244353;

struct matrix{
    int n,m;
    vector<vector<int>> arr;

    matrix(int n_, int m_){
        n = n_;
        m = m_;
        arr.resize(n,vector<int>(m,0));
    }

    matrix operator * (matrix b){
        matrix c;
        c.resize(n,b.m);
        for(int i = 0;i < n;i++){
            for(int j = 0;j < b.m;j++){
                for(int k = 0;k < m;k++){
                    c.arr[i][j] = (c.arr[i][j] + arr[i][k] * b.arr[k][j]) % MOD;
                }
            }
        }
        return c;
    }
}
```

跟 DP 有什麼關係?

費氏數列第 n 項! (CSES - Fibonacci Numbers)

費氏數列，是一個定義為以下的數列

- $f_0 = 1$
- $f_1 = 1$
- $f_n = f_{n-1} + f_{n-2}$

現在，請找到費氏數列第 n 項 ($n \leq 10^{18}$)，請輸出 $\text{mod } 10^9 + 7$ 後的結果

n 超級大欸? 該怎麼辦呢?

跟 DP 有什麼關係?

費氏數列第 n 項! (CSES - Fibonacci Numbers)

費氏數列，是一個定義為以下的數列

- $f_0 = 1$
- $f_1 = 1$
- $f_n = f_{n-1} + f_{n-2}$

現在，請找到費氏數列第 n 項 ($n \leq 10^{18}$)，請輸出 $\text{mod } 10^9 + 7$ 後的結果

我們將轉移式寫成矩陣!

$$\begin{bmatrix} f_n \\ f_{n-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_{n-1} \\ f_{n-2} \end{bmatrix}$$

跟 DP 有什麼關係?

費氏數列第 n 項! (CSES - Fibonacci Numbers)

費氏數列，是一個定義為以下的數列

- $f_0 = 1$
- $f_1 = 1$
- $f_n = f_{n-1} + f_{n-2}$

現在，請找到費氏數列第 n 項 ($n \leq 10^{18}$)，請輸出 $\text{mod } 10^9 + 7$ 後的結果

轉換一下!

$$\begin{bmatrix} f_n \\ f_{n-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}^{n-1} \begin{bmatrix} f_1 \\ f_0 \end{bmatrix}$$

跟 DP 有什麼關係?

費氏數列第 n 項! (CSES - Fibonacci Numbers)

費氏數列，是一個定義為以下的數列

- $f_0 = 1$
- $f_1 = 1$
- $f_n = f_{n-1} + f_{n-2}$

現在，請找到費氏數列第 n 項 ($n \leq 10^{18}$)，請輸出 $\text{mod } 10^9 + 7$ 後的結果

出現了次方，有什麼東西可以幫我們做次方的動作呢?

跟 DP 有什麼關係?

費氏數列第 n 項! (CSES - Fibonacci Numbers)

費氏數列，是一個定義為以下的數列

- $f_0 = 1$
- $f_1 = 1$
- $f_n = f_{n-1} + f_{n-2}$

現在，請找到費氏數列第 n 項 ($n \leq 10^{18}$)，請輸出 $\text{mod } 10^9 + 7$ 後的結果

出現了次方，有什麼東西可以幫我們做次方的動作呢？快速幂!

矩陣快速冪

因此，我們將快速冪寫成矩陣的版本

```
matrix fastpow(matrix a, int p){  
    matrix res(a.n,a.n);  
    res.arr = {{1,0},{0,1}}; //Identity Matrix  
    while(p){  
        if(p&1) res = res * a;  
        a = a * a;  
        p >>= 1;  
    }  
    return res;  
}
```

費氏數列第 n 項! (CSES - Fibonacci Numbers)

費氏數列，是一個定義為以下的數列

- $f_0 = 1$
- $f_1 = 1$
- $f_n = f_{n-1} + f_{n-2}$

現在，請找到費氏數列第 n 項 ($n \leq 10^{18}$)，請輸出 $\text{mod } 10^9 + 7$ 後的結果

我們就可以在 $O(2^3 \log n)$ 的時間找到費氏數列第 n 項了!

矩陣快速冪可以使用的地方?

一定有人很好奇，既然費氏數列可以用這樣的方式計算，那還有哪些 DP 也能這樣做呢?

矩陣快速冪可以使用的地方?

一定有人很好奇，既然費氏數列可以用這樣的方式計算，那還有哪些 DP 也能這樣做呢？
可以使用矩陣快速冪的 DP，通常會出現一種「線性遞迴」的形式

線性遞迴

每一項與前幾項的關係都是線性的!

$$dp_i = a_1 dp_{i-1} + a_2 dp_{i-2} + \cdots$$

骰骰子問題 EX (CSES - Throwing Dice)

你有一顆六面的骰子，每個骰子可以骰出 $1 \sim 6$ 點。請問你總共有幾種方式經由骰很多次骰子湊出 x 點。 $(x \leq 10^{18})$

骰骰子問題 EX (CSES - Throwing Dice)

你有一顆六面的骰子，每個骰子可以骰出 $1 \sim 6$ 點。請問你總共有幾種方式經由骰很多次骰子湊出 x 點。 $(x \leq 10^{18})$

這題上週 Colten 在 DP I 的課講過了一模一樣的例題，不過，範圍變大了？

骰骰子問題 EX (CSES - Throwing Dice)

你有一顆六面的骰子，每個骰子可以骰出 $1 \sim 6$ 點。請問你總共有幾種方式經由骰很多次骰子湊出 x 點。 $(x \leq 10^{18})$

這題上週 Colten 在 DP I 的課講過了一模一樣的例題，不過，範圍變大了？原本的轉移式是

$$dp_i = dp_{i-1} + dp_{i-2} + \cdots + dp_{i-6}$$

骰骰子問題 EX (CSES - Throwing Dice)

你有一顆六面的骰子，每個骰子可以骰出 $1 \sim 6$ 點。請問你總共有幾種方式經由骰很多次骰子湊出 x 點。 $(x \leq 10^{18})$

這題上週 Colten 在 DP I 的課講過了一模一樣的例題，不過，範圍變大了？原本的轉移式是

$$dp_i = dp_{i-1} + dp_{i-2} + \cdots + dp_{i-6}$$

事實上，這個就是一個線性遞迴的例子！

我們可以將其寫成矩陣!

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} dp_{i-1} \\ dp_{i-2} \\ dp_{i-3} \\ dp_{i-4} \\ dp_{i-5} \\ dp_{i-6} \end{bmatrix}$$

骰骰子問題 EX (CSES - Throwing Dice)

你有一顆六面的骰子，每個骰子可以骰出 $1 \sim 6$ 點。請問你總共有幾種方式經由骰很多次骰子湊出 x 點。 $(x \leq 10^{18})$

因此，這題就可以在 $O(6^3 \log x)$ 的時間完成了!

有向圖的矩陣快速幂!

在上週，Koying 有教過大家不同的存圖方式，而其中一種，就是「鄰接矩陣」
由於需要佔據 $n \times n$ 的空間，存取也不會很快，因此我們比較少用
但是，他其實有個很好的性質!

有向圖的矩陣快速冪!

Atcoder DP Contest R - Walk

你有一個 n 個節點的有向圖，以及他的鄰接矩陣。請找到這張圖共有幾個長度為 k 的有向路徑。

測資範圍: $n \leq 2000, k \leq 10^{18}$

這個問題，同樣的，我們可以列出他的 DP 狀態與轉移式

有向圖的矩陣快速冪!

Atcoder DP Contest R - Walk

你有一個 n 個節點的有向圖，以及他的鄰接矩陣。請找到這張圖共有幾個長度為 k 的有向路徑。

測資範圍: $n \leq 2000, k \leq 10^{18}$

這個問題，同樣的，我們可以列出他的 DP 狀態與轉移式 設 $dp[i][j][k]$ 表示總共有幾個長度為 k 的路徑，可以從 i 走到 j
轉移式則是

$$dp[i][j][k] = \sum_{i \rightarrow l \rightarrow j} (dp[i][l][k-1] \times dp[l][j][1])$$

有向圖的矩陣快速冪!

Atcoder DP Contest R - Walk

你有一個 n 個節點的有向圖，以及他的鄰接矩陣。請找到這張圖共有幾個長度為 k 的有向路徑。

測資範圍: $n \leq 2000, k \leq 10^{18}$

我們將轉移式進行滾動! 會得到

$$dp_k[i][j] = \sum_{l=1}^n (dp_{k-1}[i][l] \times A[l][j])$$

他其實是一個線性遞迴!

有向圖的矩陣快速幂!

Atcoder DP Contest R - Walk

你有一個 n 個節點的有向圖，以及他的鄰接矩陣。請找到這張圖共有幾個長度為 k 的有向路徑。

測資範圍: $n \leq 2000, k \leq 10^{18}$

而事實上，如果一個陣列的鄰接矩陣是 A ，則 A_{ij}^k 表示從 i 走到 j 有幾個長度為 k 的有向路徑，因此直接做矩陣快速幂即可!

更多例題

AtCoder Beginner Contest 237 F - $|\text{LIS}| = 3$

給你兩個正整數 n, m ，請找到有幾個陣列滿足 (LIS 是嚴格遞增的)

- 陣列長度為 n
- 所有數字介於 1 到 m
- 陣列的 LIS 為 3

測資範圍: $3 \leq n \leq 1000, 1 \leq m \leq 10$

AtCoder Beginner Contest 237 F - $|\text{LIS}| = 3$

給你兩個正整數 n, m ，請找到有幾個陣列滿足 (LIS 是嚴格遞增的)

- 陣列長度為 n
- 所有數字介於 1 到 m
- 陣列的 LIS 為 3

測資範圍: $3 \leq n \leq 1000, 1 \leq m \leq 10$

這題給大家一點時間思考看看，看看有沒有人有什麼想法。

AtCoder Beginner Contest 237 F - $|\text{LIS}| = 3$

給你兩個正整數 n, m ，請找到有幾個陣列滿足 (LIS 是嚴格遞增的)

- 陣列長度為 n
- 所有數字介於 1 到 m
- 陣列的 LIS 為 3

測資範圍: $3 \leq n \leq 1000, 1 \leq m \leq 10$

設 $dp[i][a][b][c]$ 表示有幾個陣列長度為 i ，且 LIS 的 v 陣列為 $\{a, b, c\}$

實作如下

```
dp[1][m+1][m+1][m+1] = 1;

for(int pos = 1; pos <= n; pos++){
    for(int i = 1; i <= m+1; i++) for(int j = 1; j <= m+1; j++) for(int k = 1; k <= m+1; k++){
        for(int x = 1; x <= m; x++){
            if(x <= i) dp[pos+1][x][j][k] = (dp[pos+1][x][j][k] + dp[pos][i][j][k]) % MOD;
            else if(x <= j) dp[pos+1][i][x][k] = (dp[pos+1][i][x][k] + dp[pos][i][j][k]) % MOD;
            else if(x <= k) dp[pos+1][i][j][x] = (dp[pos+1][i][j][x] + dp[pos][i][j][k]) % MOD;
        }
    }
}
```

Codeforces 895C - Square Subsets

現在，你有長度為 n 的陣列 a_1, a_2, \dots, a_n ，請找到陣列中有幾個相異的非空子集，其中的元素的乘積為完全平方數

測資範圍: $3 \leq 10^5, 1 \leq a_i \leq 70$

Codeforces 895C - Square Subsets

現在，你有長度為 n 的陣列 a_1, a_2, \dots, a_n ，請找到陣列中有幾個相異的非空子集，其中的元素的乘積為完全平方數

測資範圍: $3 \leq 10^5, 1 \leq a_i \leq 70$

這題同樣給大家一點時間想想看

Codeforces 895C - Square Subsets

現在，你有長度為 n 的陣列 a_1, a_2, \dots, a_n ，請找到陣列中有幾個相異的非空子集，其中的元素的乘積為完全平方數

測資範圍: $3 \leq 10^5, 1 \leq a_i \leq 70$

首先，觀察到數字最大只有到 70，小於 70 的質數一共只有 18 個！
另外一點是，如果要是完全平方數，所有質因數的次方必須是 2 的倍數！
我們用 bitmask 中第 i 位的 0/1 表示質因數的次方是偶數還是奇數。

Codeforces 895C - Square Subsets

現在，你有長度為 n 的陣列 a_1, a_2, \dots, a_n ，請找到陣列中有幾個相異的非空子集，其中的元素的乘積為完全平方數

測資範圍: $3 \leq 10^5, 1 \leq a_i \leq 70$

設 $dp[i][mask]$ 表示有幾種集合的數字乘積為 $mask$ ，答案就會是 $dp[70][0] - 1$ 了
分別枚舉 $1 \sim 70$ 每個數字要不要拿，進行轉移即可

例題

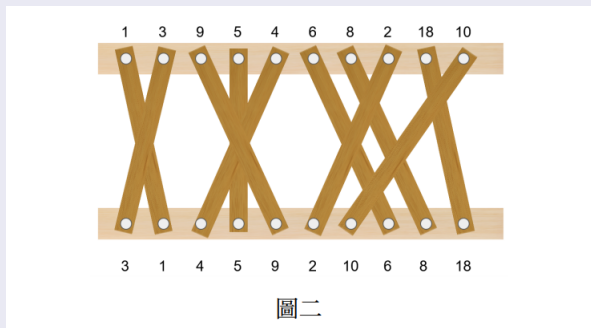
實作如下:

```
dp[0][0] = 1;
for(int i = 1; i <= 70; i++){
    for(int j = 0; j < (1<<18); j++){
        if(!cnt[i]) dp[i][j] = dp[i-1][j];
        else dp[i][j] = (dp[i][j] + dp[i-1][j] + dp[i-1][j^num[i]
            ])%MOD * fastpow(2, cnt[i]-1)%MOD;
    }
}
```

例題

TOI 2021 初選 pC - 粉刷護欄

現在有 n 個木板，他們連接在上木樑和下木樑同編號的點



你希望能找到最多不相交的木板，將他們塗成黑色，並找到一組最大字典序的解。

說到這種題目，只要遇到有兩個 permutation，通常與「逆序數對」或「LIS」有關

說到這種題目，只要遇到有兩個 permutation，通常與「逆序數對」或「LIS」有關
這題想要找的其實是 LIS

說到這種題目，只要遇到有兩個 permutation，通常與「逆序數對」或「LIS」有關
這題想要找的其實是 LIS
不過，現在他要求的是最大字典序!
一般在 DP 遇到要回溯最大字典序的題目，我們必須從後面開始做!

說到這種題目，只要遇到有兩個 permutation，通常與「逆序數對」或「LIS」有關
這題想要找的其實是 LIS

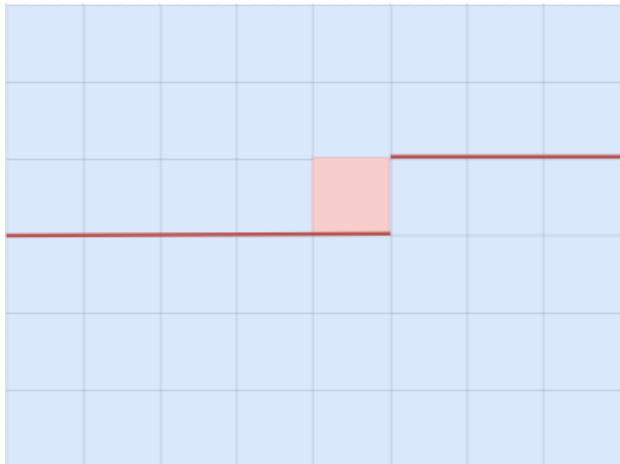
不過，現在他要求的是最大字典序!

一般在 DP 遇到要回朔最大字典序的題目，我們必須從後面開始做!

將原本的問題反過來處理，變成找 LDS (Longest Decreasing Subsequence)，同樣用二分搜
接著，我們使用 Greedy 的方式去回朔答案

補充

輪廓線 DP



Counting Tilings

請找到有幾種方式可以用 1×2 的長方形鋪滿 $n \times m$ 的表格

測資範圍: $1 \leq n \leq 10, 1 \leq m \leq 1000$