

به نام خدا

طراحی الگوریتم‌ها

آرش شفیعی



تحليل الگوریتمها

تحلیل الگوریتم‌ها

- آنالیز الگوریتم یا تحلیل الگوریتم¹ به معنای پیش بینی منابع مورد نیاز برای اجرای یک الگوریتم است. منابع مورد نیاز شامل زمان محاسبات، میزان حافظه، پهنای باند ارتباطی و مصرف انرژی می‌شود.
- معمولا برای یک مسئله الگوریتم‌های متعددی وجود دارند که هر یک می‌تواند از لحاظ تعدادی از معیارهای ارزیابی بهینه باشد.
- برای تحلیل الگوریتم از یک مدل محاسباتی استفاده می‌کنیم. در اینجا از مدل محاسباتی ماشین دسترسی تصادفی² استفاده می‌کنیم. در این مدل محاسباتی فرض می‌کنیم زمان مورد نیاز برای اجرای دستورات و دسترسی به حافظه، ثابت و به میزانی معین است.
- دستورات معمول در این مدل محاسباتی شامل دستورات محاسباتی ریاضی (مانند جمع و تفریق و ضرب و تقسیم و باقیمانده و کف و سقف)، دستورات جابجایی داده (مانند ذخیره، بارگیری و کپی) و دستورات کنترلی (مانند شرطی و انشعابی و فراخوانی تابع) می‌شوند.

¹ algorithm analysis

² random-access machine (RAM)

- عملیات محاسبه توان جزء دستورات اصلی مدل محاسباتی رم به حساب نمی‌آید، اما بسیاری از ماشین‌ها با عملیات انتقال بیت‌ها در زمان ثابت می‌توانند اعداد توانی را محاسبه کنند.
- همچنین در این مدل، سلسله مراتب حافظه مانند حافظه نهان¹ که در کامپیوترهای واقعی پیاده سازی شده است، وجود ندارد.
- مدل محاسباتی ماشین دسترسی تصادفی یک مدل ساده همانند ماشین تورینگ است که در آن دسترسی تصادفی به حافظه وجود دارد و عملیات ساده تعریف شده‌اند.

¹ cache memory

- تحلیل الگوریتم‌ها به منظور محاسبهٔ زمان اجرا و میزان حافظه مورد نیاز الگوریتم‌ها به کار می‌رود.
- زمان اجرا و میزان حافظهٔ مورد نیاز یک الگوریتم به ازای ورودی‌های مختلف متفاوت است و این مقادیر بر اساس اندازهٔ ورودی الگوریتم محاسبه می‌شوند.
- زمان اجرا و میزان حافظه مورد نیاز، معیارهایی برای سنجش کارایی الگوریتم‌ها هستند.
- در این قسمت در مورد روش‌های مختلف تحلیل الگوریتم صحبت خواهیم کرد.
- عوامل زیادی در زمان اجرای یک الگوریتم تأثیر می‌گذارند که از آن جمله می‌توان به سرعت پردازنده، کامپایلر استفاده شده برای پیاده سازی الگوریتم، اندازهٔ ورودی الگوریتم و همچنین ساختار الگوریتم اشاره کرد.

تحلیل الگوریتم‌ها

- برخی از این عوامل در کنترل برنامه نویس نیستند. برای مثال سرعت پردازنده عاملی است تأثیرگذار در سرعت اجرا که با پیشرفت صنعت سخت افزار بهبود می‌یابد و در کنترل برنامه نویس نیست. اما ساختار الگوریتم عاملی است که توسط طراح الگوریتم کنترل می‌شود و نقش مهمی در سرعت اجرا دارد.
- صرف نظر از عوامل فیزیکی، می‌توان سرعت اجرای برنامه را تابعی از اندازه ورودی الگوریتم تعریف کرد که تعداد گام‌های لازم برای محاسبه خروجی را بر اساس اندازه ورودی الگوریتم بیان می‌کند.
- تعداد گام‌های یک الگوریتم برای محاسبه یک مسئله به ساختار آن الگوریتم بستگی دارد و تابعی از اندازه ورودی مسئله است.
- البته غیر از اندازه ورودی، ساختار ورودی هم بر سرعت اجرای برنامه تأثیرگذار است. بنابراین سرعت اجرای برنامه را معمولاً در بهترین حالت (یعنی حالتی که ساختار ورودی به گونه‌ای است که الگوریتم کمترین زمان را برای اجرا بر روی یک ورودی با اندازه معین نیاز دارد) و بدترین حالت محاسبه می‌کنیم. همچنین می‌توان زمان اجرای برنامه را در حالت میانگین به دست آورد.

- یک روش برای تحلیل زمان مورد نیاز برای اجرای الگوریتم مرتب‌سازی، اجرای آن الگوریتم بر روی یک کامپیوتر و اندازه‌گیری زمان اجرا آن است.
- اما این اندازه‌گیری به ماشین مورد استفاده و کامپایلر و زبان برنامه نویسی مورد استفاده و اجرای برنامه‌های دیگر بر روی آن ماشین بستگی دارد. نوع پیاده سازی و اندازه ورودی نیز دو عامل دیگر در سرعت اجرای برنامه مرتب سازی است.
- روش دیگر برای محاسبه زمان اجرای الگوریتم مرتب‌سازی، تحلیل خود الگوریتم است. در این روش محاسبه می‌کنیم هر دستور در برنامه چندبار اجرا می‌شوند. سپس فرمولی به دست آوریم که نشان دهنده زمان اجرای برنامه است. این فرمول به اندازه ورودی الگوریتم بستگی پیدا می‌کند ولی عوامل محیطی مانند سرعت پردازنده در آن نادیده گرفته می‌شود. از این روش می‌توان برای مقایسه الگوریتم‌ها استفاده کرد.

- اندازه ورودی¹ در بسیاری از مسائل مانند مسئله مرتب‌سازی تعداد عناصر تشکیل دهنده ورودی است. در مسئله مرتب‌سازی اندازه ورودی در واقع تعداد عناصر آرایه ورودی برای مرتب‌سازی است.
- در برخی از مسائل اندازه ورودی در واقع تعداد بیت عدد صحیح ورودی است. برای مثال اندازه ورودی مسئله تجزیه یک عدد به عوامل اول، خود عدد ورودی است.
- در برخی مسائل تعداد ورودی‌ها بیش از یک پارامتر است، بنابراین اندازه ورودی به بیش از یک پارامتر بستگی پیدا می‌کند. برای مثال در الگوریتم پیدا کردن کوتاه‌ترین مسیر در یک گراف، اندازه ورودی تعداد رئوس و تعداد یال‌ها است.

¹ input size

- زمان اجرای ¹ یک الگوریتم وابسته به تعداد دستورات اجرا شده و تعداد دسترسی‌ها به حافظه است. در هنگام محاسبات برای تحلیل الگوریتم فرض می‌کنیم برای اجرای یک دستور در برنامه به یک زمان ثابت نیاز داریم. یک دستور در اجراهای متفاوت ممکن است زمان اجرای متفاوتی داشته باشد ولی فرض می‌کنیم خط k ام برنامه، در زمان c_k اجرا شود.
- کل زمان اجرای یک برنامه، مجموع زمان اجرای همه دستورات آن است. دستوری که m بار در کل برنامه تکرار می‌شود و در زمان c_k اجرا می‌شود، در کل به mc_k واحد زمان برای اجرا نیاز دارد.
- معمولاً زمان اجرای یک الگوریتم با ورودی n را با $T(n)$ نشان می‌دهیم.

¹ execution time

تحلیل الگوریتم مرتب‌سازی درجی

- الگوریتم مرتب‌سازی درجی را یک بار دیگر در نظر می‌گیریم.

Algorithm Insertion Sort

```
function INSERTION-SORT(A, n)
  ▷ A is an array of n elements
1: for i = 2 to n do
2:   key = A[i]
3:   j = i - 1
4:   while j > 0 and A[j] > key do
5:     A[j+1] = A[j]
6:     j = j-1
7:   A[j+1] = key
```

تحلیل الگوریتم مرتب‌سازی درجی

- برای محاسبه زمان اجرای الگوریتم مرتب‌سازی درجی، ابتدا تعداد تکرار هر یک از خط‌های برنامه را می‌شماریم.
- در این برنامه خط ۱ تعداد n بار و خطوط ۲ و ۳ و ۷ هر یک $n - 1$ بار تکرار می‌شوند.
- تعداد تکرار خطوط ۴ و ۵ و ۶ به تعداد تکرار حلقه بستگی دارد.
- زمان اجرای یک الگوریتم علاوه بر اندازه ورودی به ساختار ورودی نیز بستگی دارد. در الگوریتم مرتب‌سازی مسلماً مرتب‌سازی یک آرایه مرتب شده از مرتب‌سازی یک آرایه مرتب نشده سریع‌تر انجام می‌شود.

تحلیل الگوریتم مرتب‌سازی درجی

- زمان اجرای یک الگوریتم را معمولا در بهترین حالت و بدترین حالت محاسبه می‌کنیم. در بهترین حالت آرایه ورودی الگوریتم مرتب شده است. بنابراین در بهترین حالت در هر بار اجرای خط ۴، برنامه از حلقه while خارج می‌شود و بنابراین خط ۴ تعداد $n - 1$ بار اجرا می‌شود و خطوط ۵ و ۶ اجرا نمی‌شوند.
- زمان کل اجرای برنامه را می‌توانیم به صورت زیر بنویسیم.

$$\begin{aligned}T(n) &= c_1n + c_2(n - 1) + c_3(n - 1) + c_4(n - 1) + c_7(n - 1) \\&= (c_1 + c_2 + c_3 + c_4 + c_7)n - (c_2 + c_3 + c_4 + c_7)\end{aligned}$$

- زمان اجرای این الگوریتم در بهترین حالت را می‌توانیم به صورت $an + b$ بنویسیم به ازای اعداد ثابت a و b و اندازه ورودی n . بنابراین زمان اجرا در این حالت یک تابع خطی¹ از n است.

¹ linear function

تحلیل الگوریتم مرتب‌سازی درجی

- حال زمان اجرای الگوریتم مرتب‌سازی درجی را در بدترین حالت محاسبه می‌کنیم. در بدترین حالت آرایه ورودی به صورت معکوس مرتب شده است و بنابراین هر یک از عناصر آرایه نیاز به بیشترین تعداد جابجایی دارد.
- در حلقه `while` هر یک از عناصر $A[i]$ باید با همه عناصر $A[1 : i - 1]$ مقایسه شود بنابراین حلقه باید تعداد i بار به ازای $n, \dots, 3, 2$ تکرار شود.
- پس به طور کل خط ۴ باید به تعداد زیر تکرار شود.

$$\sum_{i=2}^n i = \left(\sum_{i=1}^n i \right) - 1 = \frac{n(n+1)}{2} - 1$$

تحلیل الگوریتم مرتب‌سازی درجی

- هر یک از خطوط ۵ و ۶ الگوریتم به ازای $i = 2, 3, \dots, n$ تعداد $i - 1$ بار تکرار می‌شود.
- بنابراین برای خطوط ۵ و ۶ تعداد تکرار برابر است با :

$$\sum_{i=2}^n (i - 1) = \sum_{i=1}^{n-1} i = \left(\sum_{i=1}^n i \right) - n = \frac{n(n+1)}{2} - n = \frac{n(n-1)}{2}$$

تحلیل الگوریتم مرتب سازی درجی

- زمان اجرای برنامه در بدترین حالت را می‌توانیم به صورت زیر محاسبه کنیم.

$$\begin{aligned}T(n) &= c_1n + c_2(n-1) + c_3(n-1) + c_4\left(\frac{n(n+1)}{2} - 1\right) \\&\quad + c_5\left(\frac{n(n-1)}{2}\right) + c_6\left(\frac{n(n-1)}{2}\right) + c_7(n-1) \\&= \left(\frac{c_4 + c_5 + c_6}{2}\right)n^2 + \left(c_1 + c_2 + c_3 + \frac{c_4 - c_5 - c_6}{2} + c_7\right)n \\&\quad - (c_2 + c_3 + c_4 + c_7)\end{aligned}$$

تحلیل الگوریتم مرتب سازی درجی

- بنابراین زمان اجرای الگوریتم مرتب سازی درجی در بدترین حالت را می توانیم به صورت $an^2 + bn + c$ بنویسیم به طوری که a و b و c اعداد ثابت و n ورودی برنامه است. پس زمان اجرای الگوریتم در بدترین حالت یک تابع مربعی¹ یا تابع درجه دوم از n است.

¹ quadratic function

تحلیل الگوریتم مرتب‌سازی درجی

- در حالت کلی از آنجایی که تعداد تکرارها در حلقه while مشخص نیست، زمان اجرای الگوریتم را می‌توانیم به صورت زیر بنویسیم که در آن t_i تعداد متغیر تکرارهای حلقه while است.

$$T(n) = c_1 n + c_2(n-1) + c_3(n-1) + c_4 \sum_{i=2}^n t_i \\ + c_5 \sum_{i=2}^n (t_i - 1) + c_6 \sum_{i=2}^n (t_i - 1) + c_7(n-1)$$

تحلیل الگوریتم مرتب‌سازی درجی

- معمولاً در تحلیل الگوریتم‌ها، بدترین حالت¹ زمان اجرا را محاسبه می‌کنیم.
- دلیل این امر آن است که زمان اجرا در بدترین حالت در واقع یک کران بالا² برای زمان اجرا است و الگوریتم نمی‌تواند به زمانی بیشتر از آن نیاز داشته باشد. پس می‌توانیم تضمین کنیم که الگوریتم در زمانی که در بدترین حالت محاسبه کرده‌ایم اجرا می‌شود. همچنین در بسیاری از مواقع برای بسیاری از الگوریتم‌ها بدترین حالت بسیار اتفاق می‌افتد.
- دلیل دیگر برای تحلیل الگوریتم در بدترین حالت این است که زمان اجرا در بدترین حالت و در حالت میانگین³ تقریباً معادل یکدیگرند. برای مثال در الگوریتم مرتب‌سازی درجی، در حالت میانگین در حلقه `while` هر یک از $A[i]$ ها باید با نیمی از عناصر $A[i : i - 1]$ مقایسه شوند. بنابراین $t_i = i/2$. اگر کل زمان اجرا در حالت میانگین را محاسبه کنیم، زمان اجرا یک تابع درجه دوم از اندازه ورودی به دست می‌آید. بنابراین زمان اجرا در بدترین حالت و حالت میانگین تقریباً برابرند.

¹ worst case

² upper bound

³ average case

- در تحلیل الگوریتم‌ها معمولاً در مورد مرتبه رشد¹ یا نرخ رشد توابع² صحبت می‌کنیم و جزئیات را در محاسبات نادیده می‌گیریم. در واقع محاسبه زمان اجرا را به صورت حدی در نظر می‌گیریم وقتی که اندازه ورودی بسیار بزرگ باشد. وقتی n به بینهایت میل کند هر تابع درجه دوم با ضریب ثابتی از n^2 برابر است. در این حالت می‌گوییم زمان اجرا برنامه از مرتبه n^2 است.
- برای نشان دادن مرتبه بزرگی از حرف یونانی Θ (تتا) استفاده می‌کنیم. می‌گوییم زمان اجرای مرتب‌سازی درجی در بهترین حالت برابر است با $\Theta(n)$ و زمان اجرای آن در بدترین حالت برابر است با $\Theta(n^2)$ ، بدین معنی که برای n های بسیار بزرگ زمان اجرای الگوریتم در بدترین حالت تقریباً برابر است با n^2 .
- زمان اجرای یک الگوریتم از یک الگوریتم دیگر بهتر است اگر زمان اجرای آن در بدترین حالت مرتبه رشد کمتری³ داشته باشد.

¹ order of growth

² rate of growth

³ lower order of growth

- مرتبه رشد ¹ زمان اجرای یک الگوریتم، معیار مناسبی برای سنجش کارایی ² یک الگوریتم است که به ما کمک می‌کند یک الگوریتم را با الگوریتم‌های جایگزین آن مقایسه کنیم.
- گرچه محاسبه دقیق زمان اجرا در بسیاری مواقع ممکن است، اما این دقت در بسیاری مواقع ارزش افزوده‌ای ندارد چرا که به ازای ورودی‌های بزرگ مرتبه رشد زمان اجرا تعیین کننده مقدار تقریبی زمان اجرا است.
- تحلیل مجانبی ³ در آنالیز ریاضی روشی است برای توصیف رفتار حدی توابع. در تحلیل الگوریتم‌ها نیز می‌خواهیم تابع زمان اجرا را با استفاده از تحلیل مجانبی بررسی کنیم تا زمان اجرا را وقتی ورودی الگوریتم بدون محدودیت بزرگ می‌شود بسنجیم.

¹ order of growth

² efficiency

³ asymptotic analysis

- نماد O^1 در تحلیل مجانبی توابع، کران بالای مجانبی O^2 یک تابع را مشخص می‌کند.
- تابع $f(x)$ برابر است با $O(g(x))$ اگر تابع $f(x)$ از تابع $g(x)$ سریع‌تر رشد نکند. به عبارت دیگر تابع $f(x)$ به ازای n های بسیار بزرگ از ضریب ثابتی از $g(x)$ کوچکتر است.
- برای مثال می‌گوییم تابع $2n^3 + 3n^2 + n + 4$ دارای کران بالای n^3 است و می‌نویسیم این تابع $O(n^3)$ است.
- همچنین می‌توانیم بگوییم این تابع $O(n^4)$ و $O(n^5)$ و به طور کلی $O(n^c)$ به ازای $c \geq 3$ است، چرا که سرعت رشد آن از این تابع بیشتر نیست.

¹ O-notation

² asymptotic upper bound

- به ازای تابع دلخواه $g(n)$ ، مجموعه $O(g(n))$ شامل همه توابعی است که کران بالای آنها $g(n)$ است و به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$O(g(n)) = \{f(n) : \exists c, n_0 > 0, \forall n \geq n_0, 0 \leq f(n) \leq cg(n)\}$$

- به عبارت دیگر تابع $f(n)$ به مجموعه توابع $O(g(n))$ تعلق دارد اگر عدد مثبت c وجود داشته باشد به طوری که به ازای اعداد n بزرگ‌تر از n_0 داشته باشیم $f(n) \leq cg(n)$.

- طبق این تعریف توابع $f(n)$ باید توابع غیر منفی باشند.

- از آنجایی که نماد O در واقع یک مجموعه را تعریف می‌کند می‌توانیم بنویسیم $f(n) \in O(g(n))$ ، اما گاهی برای سادگی می‌نویسیم $f(n) = O(g(n))$ و می‌خوانیم $f(n)$ از $O(g(n))$ است، یا $g(n)$ کران بالای تابع $f(n)$ است.
- برای مثال $4n^2 + 100n + 500 = O(n^2)$. باید نشان دهیم c و n_0 وجود دارند که در شرایط تعریف شده صدق می‌کنند. به عبارت دیگر $4n^2 + 100n + 500 \leq cn^2$ به ازای $n_0 = 1$ برای اینکه این نامعادله درست باشد داریم $c = 604$.

- نماد Ω^1 یا نماد اومگا کران پایین مجانبی Ω^2 یک تابع را در تحلیل مجانبی مشخص می‌کند.
- تابع $f(x)$ برابر است با $\Omega(g(x))$ اگر تابع $f(x)$ از تابع $g(x)$ سریع‌تر رشد کند. به عبارت دیگر تابع $f(x)$ به ازای n های بسیار بزرگ از ضریب ثابتی از $g(x)$ بزرگتر است.
- برای مثال می‌گوییم تابع $2n^3 + 3n^2 + n + 4$ دارای کران پایین n^3 است و می‌نویسیم این تابع $\Omega(n^3)$ است.
- همچنین می‌توانیم بگوییم این تابع $\Omega(n^2)$ و $\Omega(n)$ و به طور کلی $\Omega(n^c)$ به ازای $c \leq 3$ است.

¹ Ω -notation

² asymptotic lower bound

- به ازای یک تابع دلخواه $g(n)$ ، مجموعه $\Omega(g(n))$ شامل همه توابعی است که کران پایین آنها $g(n)$ است و به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$\Omega(g(n)) = \{f(n) : \exists c, n_0 > 0, \forall n \geq n_0, 0 \leq cg(n) \leq f(n)\}$$

- برای مثال $4n^2 + 100n + 500 = \Omega(n^2)$. به عبارت دیگر $4n^2 + 100n + 500 \geq cn^2$ به ازای همه n_0 های مثبت این نامعادله درست است اگر $c = 4$.

- نماد Θ^1 یا نماد تتا، کران اکید مجانبی Θ^2 یک تابع در تحلیل مجانبی را مشخص می‌کند.
- تابع $f(x)$ برابر است با $\Theta(g(x))$ اگر تابع $f(x)$ از تابع $g(x)$ نه سریع‌تر رشد کند و نه کندتر. به عبارت دیگر تابع $f(x)$ به ازای n های بسیار بزرگ از ضریب ثابتی از $g(x)$ بزرگتر است و از ضریب ثابتی از $g(x)$ کوچکتر است.
- اگر نشان دهیم یک تابع دارای کران بالای $f(n)$ و دارای کران پایین $f(n)$ است و یا عبارت دیگر $O(f(n))$ و $\Omega(f(n))$ است، آنگاه آن تابع دقیقاً از مرتبه $f(n)$ است و یا به عبارت دیگر $\Theta(f(n))$ است.
- برای مثال می‌گوییم تابع $2n^3 + 3n^2 + n + 4$ از مرتبه n^3 است و می‌نویسیم این تابع $\Theta(n^3)$ است.

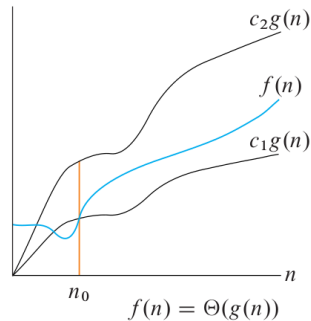
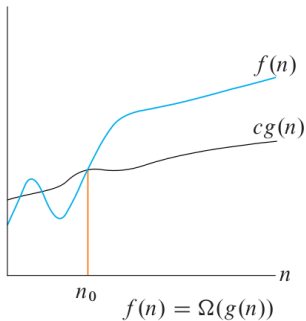
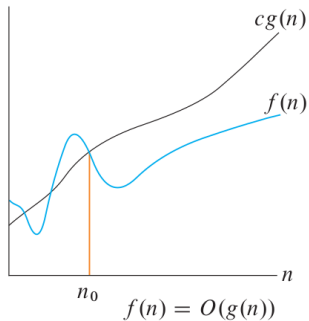
¹ Θ -notation

² asymptotically tight bound

- به ازای تابع دلخواه $g(n)$ ، مجموعه $\Theta(g(n))$ شامل همه توابعی است که کران اکید آنها $g(n)$ است، یعنی همه توابعی که $g(n)$ هم کران بالای آنها است و هم کران پایین آنها.
- به عبارت دیگر
$$\Theta(g(n)) = \{f(n) : \exists c_1, c_2, n_0 > 0, \forall n \geq n_0, 0 \leq c_1 g(n) \leq f(n) \leq c_2 g(n)\}$$
- می‌توانیم ثابت کنیم که به ازای دو تابع $f(n)$ و $g(n)$ داریم $f(n) \in \Theta(g(n))$ اگر و تنها اگر $f(n) \in O(g(n))$ و $f(n) \in \Omega(g(n))$.

- نمادهای O ، Ω ، و Θ بر روی توابع گسسته عمل می‌کند، یعنی توابعی که دامنه آنها بر روی اعداد حسابی \mathbb{N} و برد آنها بر روی اعداد حقیقی \mathbb{R} تعریف شده است. از این نمادها برای تحلیل مجانبی زمان اجرای الگوریتم‌ها یعنی $T(n)$ استفاده می‌کنیم.

- در شکل زیر مفاهیم نمادهای مجانبی نشان داده شده‌اند.



تحلیل مجانبی الگوریتم مرتب‌سازی درجی

- حال الگوریتم مرتب‌سازی درجی را یک بار دیگر در نظر می‌گیریم.

Algorithm Insertion Sort

```
function INSERTION-SORT(A, n)
  ▷ A is an array of n elements
1: for i = 2 to n do
2:   key = A[i]
3:   j = i - 1
4:   while j > 0 and A[j] > key do
5:     A[j+1] = A[j]
6:     j = j-1
7:   A[j+1] = key
```

تحلیل مجانبی الگوریتم مرتب‌سازی درجی

- می‌خواهیم اثبات کنیم زمان اجرای این الگوریتم در بدترین حالت $\Theta(n^2)$ است. باید اثبات کنیم زمان اجرای الگوریتم در بدترین حالت $O(n^2)$ و $\Omega(n^2)$ است.
- این الگوریتم در یک حلقه for به تعداد $n - 1$ بار تکرار می‌شود. به ازای هر بار تکرار در این حلقه یک حلقه درونی while وجود دارد که در بدترین حالت $i - 1$ بار تکرار می‌شود و i حداکثر n است بنابراین تعداد کل تکرارها در حلقه درونی حداکثر $(n - 1)(n - 1)$ است، که کران بالای آن n^2 است. بنابراین $T(n) < n^2$ و طبق تعریف کران بالای مجانبی $T(n) = O(n^2)$ است. بنابراین زمان اجرای این الگوریتم $O(n^2)$ است.

تحلیل مجانبی الگوریتم مرتب‌سازی درجی

- حال می‌خواهیم نشان دهیم زمان اجرای این الگوریتم در بدترین حالت $\Omega(n^2)$ است. برای این کار باید نشان دهیم حداقل یک ورودی وجود دارد که زمان اجرای آن حداقل از مرتبه n^2 است.
- فرض کنید یکی از ورودی‌های الگوریتم، آرایه‌ای است که طول آن مضرب 3 است و در این ورودی بزرگ‌ترین عناصر آرایه در یک سوم ابتدای آرایه قرار دارند. برای این که این آرایه مرتب شود همهٔ این عناصر باید به یک سوم انتهای آرایه انتقال پیدا کنند. برای این انتقال هر عنصر باید حداقل $n/3$ بار به سمت راست حرکت کند تا از ثلث میانی آرایه عبور کند. این انتقال باید برای حداقل یک سوم عناصر اتفاق بیافتد، پس زمان اجرا در این حالت حداقل $(n/3)(n/3)$ است، بنابراین $T(n) > \frac{1}{9}n^2$ و طبق تعریف کران پایین مجانبی $T(n) = \Omega(n^2)$ است.
- از آنجایی که مرتبه رشد مرتب‌سازی درجی در بدترین حالت حداکثر و حداقل از مرتبه n^2 است یعنی مرتبه رشد آن $O(n^2)$ و $\Omega(n^2)$ است، بنابراین می‌توانیم نتیجه بگیریم مرتبه رشد آن در بدترین حالت از مرتبه n^2 است یا به عبارت دیگر $\Theta(n^2)$ است.

- یک نوع دیگر تحلیل الگوریتم‌ها تحلیل تجمعی¹ است.
- در تحلیل تجمعی، نشان می‌دهیم دنباله‌ای از n عملیات در بدترین حالت به زمان $T(n)$ نیاز دارد.
- بنابراین در بدترین حالت، هزینه متوسط یا هزینه سرشکن¹، به ازای هریک از عملیات برابر است با $T(n)/n$.
- هزینه به دست آمده، هزینه متوسطی است که به ازای هریک از عملیات نیاز است حتی اگر برخی از عملیات به زمان کمتری نیاز داشته باشند.

¹ aggregate analysis

¹ amortize

- یک مثال از تحلیل تجمعی را بررسی می‌کنیم.
- یک شمارندهٔ دودویی k بیتی را در نظر بگیرید که از صفر شروع به شمارش می‌کند.
- فرض کنید برای شمارنده از آرایهٔ $A[0 : k - 1]$ استفاده کنیم. توسط آرایهٔ A عدد x نشان داده می‌شود به طوری که

$$x = \sum_{i=0}^{k-1} A[i] \times 2^i$$

- می‌خواهیم الگوریتمی بنویسیم که مقدار این شمارنده k بیتی را یک واحد افزایش دهد. الگوریتم زیر نحوه اجرای این شمارنده را نشان می‌دهد.

Algorithm Increment

```
function INCREMENT(A, k)
1: i = 0
2: while i < k and A[i] == 1 do
3:   A[i] = 0
4:   i = i + 1
5: if i < k then
6:   A[i] = 1
```

تحلیل تجمعی

- شکل زیر مقدار آرایه A را به ازای هر یک از اعداد شمارنده نشان می‌دهد. هزینه افزایش شمارنده (تعداد تکرارهای حلقه در الگوریتم شمارش) به ازای هر شمارش و همچنین به طور تجمعی در سمت راست نشان داده شده است.

Counter value	A[7]	A[6]	A[5]	A[4]	A[3]	A[2]	A[1]	A[0]	cost	Total cost
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1
2	0	0	0	0	0	0	1	0	2	3
3	0	0	0	0	0	0	1	1	1	4
4	0	0	0	0	0	1	0	0	3	7
5	0	0	0	0	0	1	0	1	1	8
6	0	0	0	0	0	1	1	0	2	10
7	0	0	0	0	0	1	1	1	1	11
8	0	0	0	0	1	0	0	0	4	15
9	0	0	0	0	1	0	0	1	1	16
10	0	0	0	0	1	0	1	0	2	18
11	0	0	0	0	1	0	1	1	1	19
12	0	0	0	0	1	1	0	0	3	22
13	0	0	0	0	1	1	0	1	1	23
14	0	0	0	0	1	1	1	0	2	25
15	0	0	0	0	1	1	1	1	1	26
16	0	0	0	1	0	0	0	0	5	31

- فرض کنید می‌خواهیم n واحد به شمارنده بیافزاییم.
- در اینجا با یک تحلیل ساده می‌توانیم زمان اجرا را به دست آوریم.
- یک بار اجرای الگوریتم در بدترین حالت در زمان $O(k)$ اجرا می‌شود.
- بنابراین دنباله‌ای از n عملیات به زمان $O(nk)$ در بدترین حالت نیاز دارد.

تحلیل تجمعی

- اما اگر بخواهیم دقیق‌تر به طور تجمعی این الگوریتم را برای n عملیات تحلیل کنیم، می‌بینیم $A[0]$ به ازای هر واحد افزایش یک بار تغییر می‌کند، $A[1]$ به ازای هر دو واحد افزایش شمارنده یک بار تغییر می‌کند، $A[2]$ به ازای هر چهار واحد افزایش شمارنده یک بار تغییر می‌کند، الی آخر.
- بنابراین پس از n واحد افزایش شمارنده، $A[0]$ تعداد n بار، $A[1]$ تعداد $\lfloor n/2 \rfloor$ بار، و $A[2]$ تعداد $\lfloor n/4 \rfloor$ بار، و به طور کل $A[i]$ تعداد $\lfloor n/2^i \rfloor$ تغییر می‌کند.
- بنابراین در مجموع برای n واحد افزایش شمارنده k بیتی، تعداد تغییرات بیت‌ها به صورت زیر محاسبه می‌شوند.

$$\sum_{i=0}^{k-1} \lfloor \frac{n}{2^i} \rfloor < n \sum_{i=0}^{\infty} \frac{1}{2^i} = 2n$$

- بنابراین در مجموع این شمارنده پس از n واحد افزایش در زمان $O(n)$ اجرا می‌شود و میانگین زمان اجرا و هزینه سرشکن به ازای یک واحد افزایش برابر است با $O(n)/n = O(1)$.