

群論

陽明交大應數系營隊

在數學中，群論 (Group theory) 研究名為「群」的代數構。群論在許多的領域都有很重要的應用。像是，倍立方、化圓為方、三等分角，五次多項式無法解的原因都可以用群論來解釋。另外，像是標準粒子模型、量子力學 (李群)、晶體結構、密碼學等領域也有很多群論的應用。

1. 群 (Group)

Definition 1.1: $\langle G, * \rangle$ 是一個集合 G 與一個二元運算 $*: G \times G \mapsto G$ ，滿足以下條件：

\mathcal{G}_1 : 對於所有的 $a, b, c \in G$ ，

$$(a * b) * c = a * (b * c) \quad \text{結合律}$$

\mathcal{G}_2 : 存在一個元素 $e \in G$ ，使得對於所有的 $a \in G$ ，

$$a * e = e * a = a \quad \text{單位元素}$$

\mathcal{G}_3 : 對於每一個 $a \in G$ ，存在一個元素 $a^{-1} \in G$ ，使得

$$a * a^{-1} = a^{-1} * a = e \quad \text{反元素}$$

Example: 我們來看一些例子：

- $\langle \mathbb{Z}, + \rangle$ 、 $\langle \mathbb{Q}, + \rangle$ 、 $\langle \mathbb{R}, + \rangle$
- $\langle \mathbb{Q}^+, \times \rangle$
- $\langle \mathbb{Z}_n, +_n \rangle$

Remark: 有時候我們會省略二元運算 $*$ ，以 G 表示一個群。

Definition 1.2: 讓 G 是一個群，定義 $|G|$ 是 G 的元素個數，稱為 G 的 **order**。

Definition 1.3: 一個群 G 如果滿足交換率 i.e. 對於所有的 $a, b \in G$ ，

$$a * b = b * a$$

，則稱 G 是一個**交換群**(Abelian groups)。

1.1. 群的性質

Theorem 1.1: 如果 G 是一個群，那**消去率**成立，即對於所有的 $a, b, c \in G$ ，

$$\begin{aligned}a * b = a * c &\Rightarrow b = c \\ b * a = b * c &\Rightarrow b = c\end{aligned}$$

Proof: 讓 G 是一個群， $a, b, c \in G$ 。假設 $a * b = a * c$ ，因為 $a \in G$ ，所以 a 的反元素 a^{-1} 存在，且 $a * a^{-1} = e$ 。

$$\begin{aligned}a * b &= a * c \\ \Rightarrow a^{-1} * a * b &= a^{-1} * a * c \\ \Rightarrow e * b &= e * c\end{aligned}$$

■

Theorem 1.2: 群 G 的單位元素 e 唯一。

Proof: 假設存在第二個單位元素 e_2 ，滿足 $e_2 * a = a * e_2 = a \ \forall a \in G$ ，因為 $e \in G$ ，所以 $e_2 * e = e * e$ ，根據消去律 $e_2 = e$ 。

■

Theorem 1.3: 讓 G 是一個群， $ab \in G$ ，那麼

$$(ab)^{-1} = b^{-1}a^{-1}$$

Proof: 我們直接相乘

$$\begin{aligned}(ab)b^{-1}a^{-1} &= a(bb^{-1})a^{-1} \quad \text{結合律} \\ &= aea^{-1} \\ &= aa^{-1} \\ &= e\end{aligned}$$

根據反元素的定義， $(ab)^{-1} = b^{-1}a^{-1}$

■

2. 置換群(Permutation Group)

我們接下來討論一個特殊的群，置換群。考慮一個集合 $A = \{1, 2, 3, 4, 5\}$ ，我們可以將 A 的元素重新排列成 $A = \{3, 1, 5, 2, 4\}$ 。我們可以將這個排列表示成一個函數 $\varphi: A \rightarrow A$ ，這個函數將1映射到3，2映射到1，以此類推。我們可以將這個排列表示成一個表格，如 Figure 1 所示。我們稱這樣的函數為一個**置換**。但是，Figure 2 的函數不是一個置換，因為4沒有被任何一個元素映射到。

$1 \rightarrow 3$
 $2 \rightarrow 4$
 $3 \rightarrow 5$
 $4 \rightarrow 2$
 $5 \rightarrow 1$

Figure 1: 一個置換

$1 \rightarrow 2$
 $2 \rightarrow 3$
 $3 \rightarrow 2$
 $4 \rightarrow 5$
 $5 \rightarrow 1$

Figure 2: 不是置換

Definition 2.1: 一個 A 的置換是一個一一對應的函數 $\varphi: A \rightarrow A$ 。(one-one and onto)

我們現在給定兩個置換 τ 和 σ ，我們定義他們的合成 $\sigma \circ \tau$ ，對於所有的 $x \in A$ ，

$$(\sigma \circ \tau)(x) = \sigma(\tau(x))$$

$$A \xrightarrow{\tau} A \xrightarrow{\sigma} A$$

因為 τ 和 σ 是一一對應的函數，所以 $\sigma \circ \tau$ 也是一一對應的函數。所以 $\sigma \circ \tau$ 是一個置換。

Example: 對於上的 σ 我們可以表示成，

$$\sigma = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 \\ 3 & 4 & 5 & 2 & 1 \end{pmatrix}$$

定義 τ 為，

$$\tau = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 \\ 2 & 3 & 4 & 5 & 1 \end{pmatrix}$$

我們可以計算 $\sigma \circ \tau$ ，

$$\sigma \circ \tau = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 \\ 3 & 4 & 5 & 2 & 1 \end{pmatrix} \circ \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 \\ 2 & 3 & 4 & 5 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 \\ 4 & 5 & 2 & 1 & 3 \end{pmatrix}$$

所以像是 $\sigma \circ \tau(1) = \sigma(\tau(1)) = \sigma(2) = 4$

Definition 2.2: 一個集合 A 的所有置換構成一個群，我們稱這個群為 A 的置換群，記作 S_A 。

Remark: S_n 表示 n 個元素的置換群。 S_n 的 order 是 $n!$ 。

2.1. 循環置換 (Cycle)

一個置換除了可以用上述的方法表示，我們還可以用循環的方式表示。我們來看蝦面的例子，定義一個置換

$$\sigma = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 \\ 3 & 4 & 5 & 2 & 1 \end{pmatrix}$$

我們觀察一下 σ 的作用，可以發現 σ 將 $1 \rightarrow 3 \rightarrow 5 \rightarrow 1$ ， $2 \rightarrow 4 \rightarrow 2$ ，所以我們可以將 σ 表示成一個循環 $\sigma = (1, 3, 5)(2, 4)$ 。



Figure 3: 一個置換的循環

3. 空間對稱群(Symmetry Groups)

接下來我們考慮一種特殊的置換群，稱為**空間對稱群**。我們考慮一個正三角形，將正三角形的頂點邊繼承1, 2, 3 (Figure 4)，然後我們把順時鐘旋轉120° 得到一個新的正三角形(Figure 5)所示。我們可以將這個操作表示成一個置換：

$$\rho_1 = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 2 & 3 & 1 \end{pmatrix} = (1, 2, 3)$$

我們稱這樣的置換是**對稱置換**，他可以把圖形打回自身。

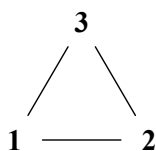


Figure 4: 正三角形

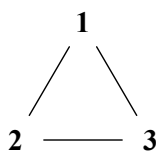


Figure 5: 順時針旋轉 120 度

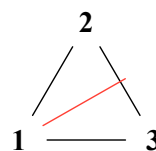


Figure 6: 沿某一軸鏡射

接下來看一下 Figure 4 到 Figure 6 的變換，我們可以得到另一個置換

$$\tau_1 = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 1 & 3 & 2 \end{pmatrix} = (1)(2, 3)$$

接著我考慮 $\tau_1 \circ \rho_1$ 這個置換，先把三角形旋轉90°，再把它沿著 Figure 6 的軸鏡射，我們可以得到一個新的置換：

$$\begin{aligned} \tau_1 \circ \rho_1 &= \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 1 & 3 & 2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 2 & 3 & 1 \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 3 & 1 & 2 \end{pmatrix} \\ &= (1, 3, 2) \end{aligned}$$

而 $\tau_1 \circ \rho_1$ 這個置換就是沿著另一個軸鏡射的置換。如下圖所示：

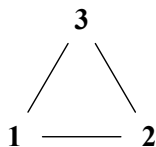


Figure 7: 正三角形

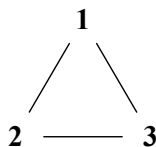


Figure 8: ρ_1

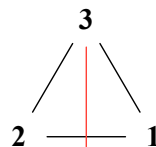


Figure 9: $\tau_1 \circ \rho_1$

我們可以繼續枚舉所有三角形的對稱操作，我們可以得到以下的置換：

$$\begin{aligned}
e = \rho_0 &= (1)(2)(3) && \text{不動} \\
\rho_1 &= (1, 2, 3) && \text{旋轉 120 度} \\
\rho_2 &= (1, 3, 2) && \text{旋轉 240 度} \\
\tau_1 &= (1)(2, 3) && \text{鏡射} \\
\tau_2 &= (1, 3, 2) && \text{鏡射} \\
\tau_3 &= (1, 2)(3) && \text{鏡射}
\end{aligned}$$

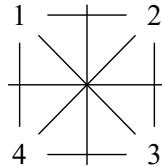
把上述的對稱置換收集起來，並用上面提到的 \circ 當作二運算，我們可以得到一個空間對稱群，稱為正三角形的對稱群 D_3 。我們可以將 D_3 寫成一個表格：

$$D_3 = \{e, \rho_1, \rho_2, \tau_1, \tau_2, \tau_3\}$$

\circ	e	ρ_1	ρ_2	τ_1	τ_2	τ_3
e	e	ρ_1	ρ_2	τ_1	τ_2	τ_3
ρ_1	ρ_1	ρ_2	e	τ_3	τ_1	τ_2
ρ_2	ρ_2	e	ρ_1	τ_2	τ_3	τ_1
τ_1	τ_1	τ_3	τ_2	e	ρ_2	ρ_1
τ_2	τ_2	τ_1	τ_3	ρ_2	e	ρ_1
τ_3	τ_3	τ_2	τ_1	ρ_1	ρ_2	e

同樣的，我們可以考慮正方形的對稱群 D_4 ，正方形的對稱群有8個元素，我們可以將 D_4 寫成一個表格：

$$D_4 = \{e, \rho_1, \rho_2, \rho_3, \tau_1, \tau_2, \tau_3, \tau_4\}$$



其中 $\tau_1 \dots \tau_4$ 是以 Figure 10 中的軸鏡射為軸的對稱操作， $\rho_1 \dots \rho_3$ 是以對角線為軸的對稱操作。我們可以把他們用循環寫下來：

$$\begin{aligned}
e &= (1)(2)(3)(4) \\
\rho_1 &= (1, 2, 3, 4) \\
\rho_2 &= (1, 3)(2, 4) \\
\rho_3 &= (1, 4, 3, 2) \\
\tau_1 &= (1)(2, 4)(3) \\
\tau_2 &= (1, 3)(2) \\
\tau_3 &= (1)(2, 4)(3) \\
\tau_4 &= (1, 3)(2)
\end{aligned}$$

值得注意的是 $\sigma = (1, 2)(4, 3)$ 他是一個置換，但不是一個對稱置換，因為他不能把正方形打回自身。

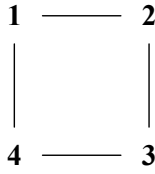


Figure 11: 正方形

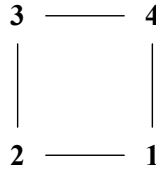


Figure 12: ρ_2

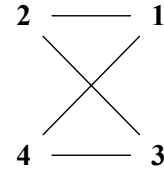


Figure 13: σ 不是一個對稱置換

4. 作用群(Group Action)

Definition 4.1: 一個群 G 對一個集合 A 的作用是一個映射 $*$: $G \times A \rightarrow A$, 滿足以下條件:

1. 對於所有 $a \in A$ $ea = a$
2. 對於所有 $a \in A$ 和 $g, h \in G$, $(gh)a = g(ha)$

在這個情況下, 我們稱 A 是一個 G -set。

Theorem 4.1: 讓 X 是一個 G -set。如果 $gx_1 = gx_2$, 那 $x_1 = x_2$

Proof: 假設 $gx_1 = gx_2$, 那麼 $g^{-1}gx_1 = g^{-1}gx_2$, 所以 $ex_1 = ex_2$, 所以 $x_1 = x_2$ 。 ■

Remark: 如果 $x \neq y$, 那 $gx \neq gy$

4.1. 不動點 (Fixed point)、穩定子群 (stabilizers subgroup)、軌道 (Orbits)

Definition 4.2: 讓 X 是一個 G -set, 讓 $x \in X$, $g \in G$ 。我們定義:

$$\text{Stab}_G(x) = \{g \in G \mid gx = x\}$$

$$X^g = \{x \in X \mid gx = x\}$$

$\text{Stab}_G(x)$ 稱為 x 的穩定子群, X^g 稱為 g 的不動點。

Theorem 4.2: 讓 X 是一個 G -set, 我們定義一個在 X 上的關係 \sim , 對於所有的 $x, y \in X$, $x \sim y$ 當且僅當存在 $g \in G$, 使得 $gx = y$ 。這個關係是一個等價關係。

Proof:

自反性: 對於所有的 $x \in X$, $x \sim x$, 因為 $ex = x$ 。

對稱性: 如果 $x \sim y$, 那麼存在 $g \in G$, 使得 $gx = y$, 所以 $g^{-1}y = x$, 所以 $y \sim x$ 。

傳遞性: 如果 $x \sim y$ 且 $y \sim z$, 那麼存在 $g, h \in G$, 使得 $gx = y$ 且 $hy = z$, 所以 $hgx = z$, 所以 $x \sim z$ 。 ■

Definition 4.3: 讓 X 是一個 G -set, 每一個在 Theorem 4.2 下的等價類稱為一個軌道。如果 $x \in X$, 包含 x 的分割是 x 的軌道, 記作 G_x 。

Theorem 4.3: 讓 X 是一個 G -set, $x \in X$, 那麼 x 的軌道 $G_x = \{gx \mid g \in G\}$ 。

Theorem 4.4 (軌道-穩定子定理 (Orbit-Stabilizer Theorem)): 讓 G 是一個有限群, 讓 X 是一個 G -set, $x \in X$, 那麼 $|G| = |G_x| |G_x(x)|$ 。

Proof: 定義 $f: G \rightarrow G_x$, $f(g) = gx$ 。我們證明每一個在 G_x 裡的元素都被打到 $|G_x(x)|$ 這麼多次。

給定一個 $y \in G_x$, 那麼存在 $h \in G$ 使得 $y = hx$ 。

如果 $g \in \text{Stab}_G(x)$, 那 $gx = x$, 所以

$$f(hg) = hgx = hx = y$$

如果 $g \notin \text{Stab}_G(x)$, 那麼 $gx \neq x$, 所以

$$f(hg) = hgx \neq hx = y$$

所以 y 被打到那麼多次 $|G_x(x)|$, 所以 $|G| = |G_x| |G_x(x)|$ 。 ■

4.2. 伯恩賽德引理 (Burnside's Lemma)

Theorem 4.5 (伯恩賽德引理): 讓 G 是一個有限群, 讓 X 是一個 G -set。讓 r 是 X 的軌道數, 那麼

$$r \cdot |G| = \sum_{g \in G} |X^g|$$

Proof: (雙重計數) 我們考慮序組 (g, x) , 其中 $gx = x$ 。假設這樣的序組有 N 個。對於每一個 $g \in G$, 我們計算 (g, x) 的數量, 這個數量是 $|X^g|$ 。所以

$$N = \sum_{g \in G} |X^g| \quad (1)$$

另一方面, 對於每一個 $x \in X$, 我們計算 (g, x) 的數量, 這個數量是 $|G_x(x)|$ 。所以

$$N = \sum_{x \in X} |G_x(x)| \quad (2)$$

根據 **軌道穩定子定理** Thm 4.4, $|G_x(x)| |G_x| = |G|$, 所以,

$$N = \sum_{x \in X} |G_x(x)| = \sum_{x \in X} \frac{|G|}{|G_x|} = |G| \sum_{x \in X} \frac{1}{|G_x|} \quad (3)$$

對於在相同軌道的元素, $|G_x|$ 是相同的。讓 \mathcal{O} 是一個軌道, 我們有

$$\sum_{x \in \mathcal{O}} \frac{1}{|G_x|} = \sum_{x \in \mathcal{O}} \frac{1}{|\mathcal{O}|} = 1 \quad (4)$$

用 (3) 代入 (2), 我們得到

$$N = |G| \cdot (\text{軌道的數量}) = |G| \cdot r \quad (5)$$

因此，結合 (1) 和 (4)，我們得到

$$r \cdot |G| = \sum_{g \in G} |X^g| \quad (6)$$

■

Example: 用4個顏色對一個正三角形的三個邊進行著色，有幾種不同的著色方法？(兩種著色方式被認為是相同的，如果他們可以通過旋轉、鏡射相互變換)

我們讓 $G = D_3$ 是三角型的對稱群， X 是所有著色的結果 ($|X| = 4^3$)，所以我們要求 X 在 G 下有幾個軌道。根據前的討論，我們知道 $|G| = 6$ ，然後我們計算不動點的個數：

$$|X^{\rho_0}| = 4^3$$

$$|X^{\rho_1}| = 4$$

$$|X^{\rho_2}| = 4$$

$$|X^{\tau_1}| = 4^2$$

$$|X^{\tau_2}| = 4^2$$

$$|X^{\tau_3}| = 4^2$$

根據伯恩賽德引理，我們有

$$6r = 4^3 + 4 + 4 + 4^2 + 4^2 + 4^2 r = 20$$

所以正三角形的相異著色方法有20種。

4.3. 著色多項式

我們考慮我們有 n 個顏色，幫一個有對稱性的圖形上色，我們假設在對稱性下有 r 種上色方式。讓 X 是所有上色方法的集合，讓 G 是該圖形的對稱群，根據伯恩賽德引理，我們有

$$r = \frac{1}{|G|} \sum_{g \in G} |X^g|$$

其中 X^g 是在 g 下的不動點的集合。我們觀察一下 $g \in G$ ，我們知道 g 可以被寫成循環的形式，像是下面這樣：

$$g = \underbrace{(1, 2, 3)(5, 4) \dots (\#, \#)}_{m_g}$$

所以 g 種共有 m_g 個循環。我們發現在這種情況下要在 g 下不動的著色方法必須滿足「每個循環內的顏色都一樣」，所以 $|X^g| = n^{m_g}$ 所以我們得到，

$$r = \frac{1}{|G|} \sum_{g \in G} |X^g| = \frac{1}{|G|} \sum_{g \in G} n^{m_g}$$

Example: 我們考慮有 n 個顏色，對一個正四邊形上色，我們要求在對稱性下有幾種不同的著色方法。我們讓 $G = D_4$ 是正四邊形的對稱群， X 是所有著色的結果 ($|X| = n^4$)，所以我

們要求 X 在 G 下有幾個軌道。根據前的討論，我們知道 $|G| = 8$ ，然後我們計算不動點的個數：

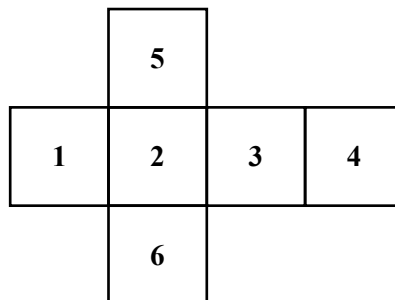
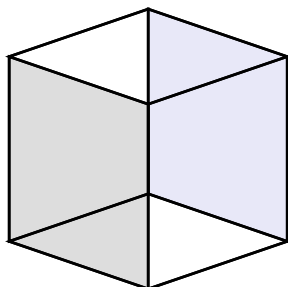
- 單位變換 $m_g = 4$
- 2個 $m_g = 1$ 的旋轉($90^\circ, 270^\circ$)，e.x. $g = (1, 2, 3, 4)$
- 1個 $m_g = 2$ 的旋轉(180°)，e.x. $g = (1, 2)(3, 4)$
- 2個 $m_g = 3$ 的鏡射(對角線的鏡射)，e.x. $g = (1)(3)(2, 4)$
- 2個 $m_g = 2$ 的鏡射(中線的鏡射)，e.x. $g = (1, 3)(2, 4)$

所以我們有

$$r = \frac{1}{8}(n^4 + 2n + 2n^2 + 2n^3 + 2n^4)$$

$$r = \frac{1}{8}(n^4 + 2n^3 + 2n^2 + 2n)$$

Example: 我們現在有 n 個顏色，幫一個正六面體上色，可以通過旋轉變換得到視為相同的著色方式。總共有多少種不同的著色方式？



讓 D 是正六面體的對稱群，我們根據之前的討論，我們知道 $|D| = 24$ ，我們討論裡面的變換：

1. 單位變換: $(1)(2)(3)(4)(5)(6)$
2. 固定兩對面然會旋轉 $90^\circ, 270^\circ$ ，如: $(1, 2, 3, 4)(5)(6)$ ，共 6 個。
3. 固定兩對面然會旋轉 180° ，如: $(1, 3)(2, 4)(5)(6)$ ，共 3 個。
4. 固定兩對邊旋轉 180° ，如: $(1, 5)(3, 6)(2, 4)$ ，共 6 個。
5. 固定兩個對頂點旋轉 $120^\circ, 240^\circ$ ，如: $(1, 5, 4)(2, 3, 6)$ ，共 8 個

所以我們有

$$r = \frac{1}{24}(n^6 + 6n^3 + 3n^4 + 6n^3 + 8n^2)$$

$$r = \frac{1}{24}(n^6 + 3n^4 + 12n^3 + 8n^2)$$