מבנים אלגבריים 1

20 במאי 2024

תוכן העניינים

שיעור 1 — 6.5.2024

הקורס עוסק בעיקרו בתורת החבורות, ממנה גם מתחילים.

חבורה (באנגלית Group) היא מבנה מתמטי.

ברעיון חבורה מייצגת סימטריה, אוסף השינויים שאפשר לעשות על אובייקט ללא שינוי שלו, קרי שהוא ישאר שקול לאובייקט במקור.

מה הן הסימטריות שיש לריבוע? אני יכול לסובב ולשקף אותו בלי לשנות את הצורה המתקבלת והיא תהיה שקולה. חשוב להגיד שהפעולות האלה שקולות שכן התוצאה הסופית זהה למקורית.

אפשר לסובב ספציפית אפס, תשעים מאה שמונים ומאתיים שבעים מעלות, נקרא לפעולות האלה A, B, C בהתאמה.

בנוסף אפשר לשקף סביב ציר האמצע, ציר האמצע מלמעלה, ועל האלכסונים, ניתן גם לאלה שמות, נקרא לפעולות אלה בהתאמה D, E, F, G, H.

אלה הפעולות הבסיסיות ואי אפשר לעשות פעולה שלא בקבוצה הזאת, אבל אפשר להרכיב את הפעולות האלה והתוצאה הסופית תהיה שקולה לפעולה מהקבוצה.

נגדיר את הפעולות:

$$D_4 = \{A, B, C, D, E, F, G, H\}, \circ : D_4 \times D_4 \to D_4$$

נראה כי הרכבת פעולות שקולה לפעולה קיימת:

$$E \circ G = C, E \circ B = H, B \circ F = F$$

חשוב לשים לב שהפעולה הזאת לא חילופית: $X \circ Y \neq Y \circ X$.

היא כן קיבוצית: $X \circ (Y \circ Z) = (X \circ Y) \circ Z$.

תכונה נוספת היא קיום האיבר הנייטרלי, במקרה הזה A. איבר זה לא משפיע על הפעולה הסופית, והרכבה איתו מתבטלת ומשאירה רק את האיבר השני:

$$\forall X \in D_4 : A \circ X = X \circ A = X$$

התכונה האחרונה היא קיום איבר נגדי:

$$\forall X \in D_4 \exists Y \in D_4 : X \circ Y = Y \circ X = A$$

הגדרה: חבורה

חבורה היא קבוצה G עם $\circ : G \times G \to G$ ואיבר $e \in G$ כך שמתקיימות התכונות הבאות:

1. אסוציאטיביות (חוק הקיבוץ): $\forall x, y, z \in G : (x \circ y) \circ z = x \circ (y \circ z)$.
2. קיום איבר נייטרלי: לכל $x \in G$ מתקיים $x \circ e = e \circ x = x$.
3. קיום איבר נגדי: לכל $x \in G$ קיים $y \in G$ כך שמתקיים $x \circ y = y \circ x = e$.

חשוב לציין כי זו היא לא הגדרה מינימלית, ניתן לצמצם אותה, לדוגמה להגדיר שלכל איבר יש הופכי משמאל בלבד (יש להוכיח שקילות).

למה: קיום איבר נייטרלי יחיד

אם $e_1, e_2 \in G$ נייטרליים אז $e_1 = e_2$.

הוכחה. $e_1 = e_1 \circ e_2 = e_2$ □

דהינו, קיים איבר נייטרלי יחיד.

דוגמות

הקורס מבוסס על הספר "מבנים אלגבריים" מאת דורון פודר, אלכס לובוצקי ואהוד דה שליט, אך יש הבדלים, חשוב לשים לב אליהם. ניתן לקרוא שם דוגמות.

דוגמות כלליות לחבורות, עבור $(\mathbb{F}, +, \cdot, 0, 1)$ שדה:

1. חבורה החיבורית היא $(\mathbb{F}, +, 0)$
2. החבורה הכפלית היא $(\mathbb{F}, \cdot, 1)$

הסימון הכי נפוץ לפעולה של החבורה היא כפל או נקודה או לא בכלל: $xy = x \cdot y$.

הגדרה: חבורה קומוטטיבית

חבורה G תיקרא קומוטטיבית או חילופית או אבלית (על שם המתמטיקאי אבל) אם $xy = yx$ לכל $x, y \in G$.

חשוב להבין, למה שסימטריות תהינה חילופיות.

דוגמות לחבורות קומוטטיביות

$(\mathbb{Z}, +, 0)$ חבורת החיבור מעל השלמים, היא חבורה קומוטטיבית.

באופן דומה גם $(\mathbb{Z}_n, +, 0)$.

דוגמות לחבורות שאינן קומוטטיביות

- $(D_4, \circ, A)$ אשר מייצג את הריבוע עליו דובר בתחילת ההרצאה
- S_n תמורות על $1, \dots, n$ עם הרכבה.
  תמורה היא פעולה שמחליפה שני איברים כפונקציה, לדוגמה $s(1) = 2, s(2) = 1, s(n) = n$.
  S_n הוא מקרה פרטי של תמורות על קבוצה $\{1, \dots, n\}$
- $\mathrm{Sym}(X) = \{f : X \to X \mid f$ הופכית, חח"ע ועל$\}$
  תמורות הן סימטריה של קבוצה, כל תמורה היא העתקה חד־חד ערכית ועל שמשמרת את מבנה הקבוצה.
- $GL_n(\mathbb{F})$ מטריצות $n \times n$ הפיכות מעל שדה $\mathbb{F}$.
- אם V מרחב וקטורי מעל שדה $\mathbb{F}$ אז
  $GL(V) = \{f : V \to V \mid f$ לינארית וחד חד ערכית$\}$

נשים לב כי $GL_n(\mathbb{F}) \cong GL(\mathbb{F}^n)$, דהינו הם איזומורפיים. זה לא אומר שהם שווים, רק שיש להם בדיוק אותן תכונות.

גם בקבוצות שתי קבוצות עם אתו גודל הן איזומורפיות אך לא שקולות.

תרגול 1 — 7.5.2024

דוגמות לחבורות

לא חבורה בגלל 0	$(\mathbb{Z}, \cdot, 1)$
לא חבורה בגלל מטריצות רגולריות ומטריצת האפס לדוגמה	$(M_{n\times n}(\mathbb{R}), \circ, I_n)$
אכן חבורה	$(\mathbb{Z}_4, +_4, 0)$
אכן חבורה	$(\mathbb{Z}_3, +_3, 0)$
לא חבורה, $2 \cdot 2 = 0$	$(\mathbb{Z}_4^*, \cdot, 1)$
אכן חבורה, מבוסס על מספר ראשוני	$(\mathbb{Z}_3^*, \cdot, 1)$

הערה לא קשורה: הסימון של כוכבית מסמן הסרת כלל האיברים הלא הפיכים מהקבוצה.

כל שלישייה $(\mathbb{Z}_p \backslash \{0\}, \cdot_p, 1)$ היא חבורה בתנאי ש־p הוא ראשוני.

תכונות בסיסיות של חבורות

יחידות האיבר הנייטרלי	$e_1 = e_1 e_2 = e_2$
יחידות ההופכי	$x \in G, y, y_1 = x^{-1} : y = y \cdot e = yxy_1 = e \cdot y_1 = y_1$

תהי G חבורה, $g = x_1 \cdot \ldots \cdot x_n$ ביטוי לא תלוי בהצבת סוגריים, טענה זו אפשר להוכיח באינדוקציה.

לכל $n, m \in \mathbb{N}$ מתקיים גם $(x^n)^m = x^{n\cdot m}$ ואף $x^n \cdot x^m = x^{n+m}$.

תתי־חבורות

תהי חבורה $(G, \cdot_G, e_G)$, ותהי $H \subseteq G$ תת־קבוצה, אז $(H, \cdot_G, e_G)$ תיקרא תת־חבורה אם היא מהווה חבורה תקינה. נסמן $H \leqslant G$.

לדוגמה נראה $(2\mathbb{Z}, +, 0) \leqslant (\mathbb{Z}, +, 0)$ חבורת הזוגיים בחיבור היא תת־חבורה של השלמים.

$(\mathrm{diag}_n(\mathbb{R}), \circ, I_n) \leqslant (GL_n(\mathbb{R}), \circ, I_n)$ חבורת המטריצות האלכסוניות היא תת־חבורה של המטריצות.

$(GL_n(\mathbb{Q}), \circ, I_n) \leqslant (GL_n(\mathbb{R}), \circ, I_n)$ מטריצות הפיכות מעל הרציונליים חלקיות למטריצות הפיכות מעל הממשיים.

קריטריון מקוצר לתת־חבורה

תהי G חבורה ותהי קבוצה $H \subseteq G$ אז $H \leqslant G$ (תת־חבורה של G) אם ורק אם:

1. $e_G \in H$, איבר היחידה נמצא ב־H
2. $\forall x \in H : x^{-1} \in H$, לכל איבר גם האיבר ההופכי לו נמצא בקבוצה
3. $\forall x, y \in H : x \cdot y \in H$, הקבוצה סגורה לכפל האיברים בה

דוגמות

$1 \in \mathbb{N}_0 \wedge -1 \notin \mathbb{N}_0$	$(\mathbb{N}_0, +, 0) \nsubseteq (\mathbb{Z}, +, 0)$
כלל התנאים מתקיימים	$\{0, 2, 4, 6, 8\} \subseteq (\mathbb{Z}_{10}, +_{10}, 0)$

טענה: תת־חבורה לחבורה סופית

אם חבורה היא סופית, אז תנאי 2 איננו הכרחי לתתי־חבורות.

הוכחה. תהי G חבורה סופית ותהי $H \subseteq G$ אשר מקיימת את סעיפים 1 ו־3 בקריטריון.

יהי $x \in H$, נבחין כי $\{x^n \mid n \in \mathbb{N}\} \subseteq H$ בעקבות סעיף 3 של הקריטריון.

לכן קיימים שני מספרים $n, m \in \mathbb{N}$ כך ש־$n < m$ אשר מקיימים $x^n = x^m$.

כמובן מתקיים $x^n \cdot x^{-m} = e$ ומהסגירות לכפל נובע כי $x^{n-m} \in H$ ומצאנו כי התנאי השני מתקיים. $\square$

חבורת התמורות

תהי X קבוצה, אז $\text{Sym}(X)$ היא קבוצת הפונקציות החד־חד ערכיות ועל מ־X לעצמה.

$(\text{Sym}(X), \circ, Id)$ היא חבורה, מורכבת מכלל התמורות, הרכבת פונקציות ופונקציית הזהות.

אם X היא קבוצה סופית אז $S_n = \text{Sym}(X)$, ובדרך כלל נגדיר $X = [n] = \{1, \dots, n\}$, וחבורת התמורות תהיה $(S_n, \circ, Id)$.

הגדרה: סדר של חבורה

סדר של חבורה הוא מספר האיברים בחבורה.

אילו G אז נגיד שסדר החבורה הוא אינסוף.

נסמן את הסדר $|G|$.

אילו G חבורה ו־$x \in G$, הסדר של x הוא $n \in \mathbb{N}$ המינימלי כך שמתקיים $x^n = e$, נסמנו $|x|$ או $\sigma(x)$.

חזרה לתמורות

נשים לב שמתקיים $|S_n| = n!$.

$\sigma \in S_n$, נכתוב את התמורה כך:

$$\begin{pmatrix} 1 & 2 & \cdots & n \\ \sigma(1) & \sigma(2) & \cdots & \sigma(n) \end{pmatrix}$$

לדוגמה $\begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 2 & 1 & 3 \end{pmatrix}$.

אילו $\sigma \in S_n$ ו־$i \in [n]$ נקיים $\sigma(i) = i$ אז i נקרא **נקודת שבט** של σ.

בדוגמה שנתנו, $\sigma(3) = 3$ ולכן זוהי נקודת שבט של σ.

תתי־חבורות של חבורת התמורות

גודמה ראשונה:

$$\left\{\begin{pmatrix}1 & 2 & 3\\ 1 & 2 & 3\end{pmatrix}, \begin{pmatrix}1 & 2 & 3\\ 2 & 1 & 3\end{pmatrix}\right\} \subseteq S_3$$

היא תת־חבורה של S_3 שכן כללי הקריטריון מתקיימים מבדיקה.

גם $\{\sigma \in S_n \mid \sigma(1) = 1\}$ היא תת־חבורה, שכן $\sigma(\tau(1)) = \tau(\sigma(1)) = 1$.

לעומת זאת $\{\sigma \in S_n \mid \sigma(1) \in \{1, 2, 3\}\}$ איננה חבורה. נראה כי אם σ, τ המקיימות $\tau(1) = 2, \tau(2) = 1, \sigma(2) = 4, \sigma(4) = 2$ וכל השאר נקודות שבט, $\sigma(\tau(1)) = 4$ שלא נמצא בקבוצה על־פי הגדרתה.

מחזורים

מחזור הוא רצף של איברים שהתמורה מחזירה כרצף, זאת אומרת שהתמורה עבור האיבר הראשון במחזור תחזיר את השני, השני את השלישי וכן הלאה.

הגדרה: מחזור פשוט $\sigma \in S_n$ יקרא l־**מחזור** אם קיימים $x_1, \dots, x_l \in [n]$ כך שלכל $0 \leqslant i < l$ מתקיים $\sigma(x_i) = x_{i+1}$ ו־$\sigma(x_l) = x_0$.

טענה: כל תמורה היא הרכבה של מספר כלשהו של מחזורים, ההוכחה מסתמכת על היכולת לשרשר את ערכי המחזור משרשראות שאינן נוגעות אחת לשנייה.

לדוגמה, נבחין כי אם

$$\sigma = \begin{pmatrix}1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7\\ 6 & 2 & 7 & 5 & 1 & 4 & 3\end{pmatrix}$$

אז נוכל להרכיב $\sigma = (1\,6\,4\,5)(2)(3\,7)$.

נשים לב למקרה מיוחד, יהי $\sigma \in S_n$ כך ש־σ הוא l־מחזור, ונגדיר $\sigma = (x_1\,x_2\,\dots\,x_l)$.

בהינתן $\tau \in S_n$, מתקיים

$$\tau \circ \sigma \circ \tau^{-1} = (\tau(x_1)\,\tau(x_2)\,\dots\,\tau(x_n))$$

זאת שכן לדוגמה $\sigma(\tau^{-1}(\tau(x_1))) = \sigma(x_1)$ ובהתאם $(\tau \circ \sigma \circ \tau^{-1})(x_1) = \tau(x_1)$.

שיעור 2 — 8.5.2024

מבוא לאיזומורפיות

המטרה שלנו היא להבין מתי שתי חבורות שונות הן שקולות, ולחקור את מושג האיזומורפיות.

נבחן את $\mathbb{Z}/2$ ואת $(\{\pm 1\}, \cdot)$ ובשתיהן יש רק שני איברים, אחד נייטרלי ואחד לא, ובשתיהן הפעולות מתנהגות אותו דבר בדיוק.

$$1 \leftrightarrow -1, 1 \leftrightarrow 0$$

עוד דוגמה היא $(\mathbb{R}, +)$ ו־$(\mathbb{R}^{>0}, \cdot)$.

$$(\mathbb{R}, +) \xrightarrow{\exp} (\mathbb{R}^{>0}, \cdot), \exp(x+y) = \exp(a)\exp(b)$$

הגדרה: הומומורפיזם

עבור G ו־H חבורות:

הומומורפיזם מ־G ל־H היא פונקציה $\varphi : G \to H$ שמקיימת:

1. $\varphi(e_G) = e_H$
2. $\varphi(xy) = \varphi(x)\varphi(y)$
3. $\varphi(x^{-1}) = \varphi(x)^{-1}$

למה: תנאי הכרחי להומומורפיזם

$\varphi : G \to H$ היא הומומורפיזם אם ורק אם לכל $x, y \in G$ מתקיים $\varphi(xy) = \varphi(x)\varphi(y)$.

הוכחה. נראה ששלושת התכונות מתקיימות:

1. נבחר $x \in G$ ונראה כי $e_H = \varphi(e_G) \iff \varphi(x) = \varphi(e_G x) = \varphi(e_G)\varphi(x)$.
2. נתון
3. $\varphi(e_G) = \varphi(xx^{-1}) = \varphi(x)\varphi(x^{-1}) = e_H \implies \varphi(x^{-1}) = \varphi^{-1}(x)e_H$

ומצאנו כי שלושת התנאים מתקיימים. □

הגדרה: איזומורפיזם

איזומורפיזם G ל־H הוא הומומורפיזם חד־חד ערכי ועל ומסומן $\varphi : G \xrightarrow{\sim} H$.

למה: הופכי לאיזומורפיזם

עבור $\varphi : G \xrightarrow{\sim} H$ גם ההופכי הומומורפיזם (ולכן גם איזומורפיזם).

הוכחה. נראה כי לכל $x, y \in H$:

$$\varphi^{-1}(xy) = \varphi^{-1}(\varphi(\varphi^{-1}(x))\varphi(\varphi^{-1}(y))) = \varphi^{-1}(x)\varphi^{-1}(y)$$

ומצאנו כי התנאי ההכרחי להומומורפיזם מתקיים. □

מסקנה: תנאי הכרחי לאיזומורפיזם

המומורפיזם $\varphi : G \to H$ הוא איזומורפיזם אם ורק אם קיים הומומורפיזם $\psi : H \to G$ כך שמתקיים $\varphi \circ \psi = \psi \circ \varphi = Id_G$.

הגדרה: איזומורפיות

נגדיר שתי חבורות **כאיזומורפיות** אם ורק אם קיים איזומורפיזם ביניהן.
נשים לב שמספר האיזומורפיזמים בין החבורות, גם אם הוא אינסופי, הוא חסר משמעות, ובמקום אנו מסתכל על עצם האיזומורפיות.

דוגמה לחבורות איזומורפיות הן $\mathbb{Z}/2 \cong (\{\pm 1\}, \cdot)$ כפי שראינו בהתחלה.
חשוב לשים לב שגם אם יש כמות איברים זהה בין החבורות, הן לא בהכרח תהינה איזומורפיות, לדוגמה $GL_2(\mathbb{F}_2)$, חבורת המטריצות ההפיכות מעל שדה עם שני איברים. יש בשורה העליונה 3 אפשרויות, ובשורה השנייה 2 ולכן יש 6 איברים בחבורה הזו. גם ב־S_3 יש בדיוק שישה איברים, אבל $S_3 \ncong GL_2(\mathbb{F}_2)$. גם החבורה החיבורית $\mathbb{Z}/6$ היא חבורה עם שישה איברים. החבורה הראשונה לא קומוטטיבית והשנייה כן, כי כפל מטריצות לא ניתן לשינוי סדר.

למה: הרכבת הומומורפיזמים

$\varphi : G \to H$ ו־$\psi : H \to K$ שני הומומורפיזמים, אז גם $\psi \circ \varphi : G \to K$ הוא הומומורפיזם.

הוכחה. $\forall x, y \in G : (\psi \circ \varphi)(xy) = \psi(\varphi(xy)) = \psi(\varphi(x)\varphi(y)) = \psi(\varphi(x))\psi(\varphi(y)) = (\psi \circ \varphi)(x)(\psi \circ \varphi)(y)$ $\square$

מסקנה: הרכבת איזומורפיזמים

הרכבה של איזומורפיזמים היא איזומורפיזם.

הגדרה: אוטומורפיזם

אוטומורפיזם של G הוא איזומורפיזם $G \xrightarrow{\sim} G$. נסמן ב־$Aut(G)$ את קבוצת האוטומורפיזמים של G.

למה: חבורת האוטומורפיזמים

$Aut(G)$ היא חבורה ביחס להרכבה.

הוכחה. הרכבה היא אסוציאטיבית, העתקת הזהות מוכלת בקבוצה ונייטרלי להרכבה, והוכחנו שלכל אוטומורפיזם φ יש הופכי $\varphi^{-1} \in Aut(G)$. $\square$

מהי $Aut(\mathbb{Z})$? לדוגמה $\varphi(n) = n + 1$. פונקציה זו איננה אוטומורפיזם שכן $\varphi(1) + \varphi(3) = 6 \neq 5 = \varphi(4) = \varphi(1+3)$.
פונקציית הזהות היא אוטומורפיזם, והפונקציה $\varphi(n) = -n$ על־פי בדיקה ישירה של הגדרות.
נבחן את פונקציית הכפל בקבוע, $\varphi(n) = 2n$, נראה כי $\varphi(n) + \varphi(m) = 2n + 2m, \varphi(n+m) = 2(n+m) = 2n + 2m$. הומומורפיזם, אבל לא כל איבר שייך לקבוצה השנייה ולכן לא אוטומורפיזם.

$$Aut(\mathbb{Z}) = \{Id, -Id\} \cong \mathbb{Z}/2$$

טענה, ערך Aut (Z)

$Aut(\mathbb{Z}) = \{Id, -Id\}$.

הוכחה. יהי $\varphi : \mathbb{Z} \xrightarrow{\sim} \mathbb{Z}$, ראשית נראה כי $\varphi(n) = n\varphi(1)$.

עבור $n = 0$ ברור, עבור $n > 1$ נראה כי $\varphi(n) = \varphi(1 + \cdots + 1) = \varphi(1) + \cdots + \varphi(1) = n\varphi(1)$.

עבור $n \leqslant 1$ נשתמש ב־$\varphi(-1) = -1$ ובהתאם $\varphi(-n) = (-n)\varphi(1)$. תתקן אחר כך את הסימנים.

לכן $\varphi(1) = \pm 1 \implies \varphi = \pm Id$. □

הגדרה: מכפלת חבורות

אם G ו־H הן חבורות, המכפלה הישרה ל G ו־H או $G \times H$ היא החבורה שמקיימת $G \times H = \{(x, y) \mid x \in G, y \in H\}$. עם הפעולה $(x_1, y_1) \cdot (x_2, y_2) = (x_1x_2, y_1y_2)$ והנייטרלי $e = (e_G, e_H) \in G \times H$

נראה בהמשך שמתקיים $\mathbb{Z}/6 \cong \mathbb{Z}_2 \times \mathbb{Z}_3$. אבל $\mathbb{Z}/4 \ncong \mathbb{Z}/2 \times \mathbb{Z}/2$.

הגדרה: תת־חבורה

G חבורה, ותהי תת־קבוצה $H \subseteq G$ נקראת תת־חבורה אם

1. $e \in H$
2. $x, y \in H \implies xy \in H$
3. $x \in H \implies x^{-1} \in H$

נשים לב כי תת־קבוצה $H \subseteq G$ היא תת־חבורה אם ורק אם H חבורה ביחס לאותה פעולה של G.

מסמנים $H \leqslant G$ תת־חבורה.

דוגמות:

- $\{0°, 90°, 180°, 270°\} \leqslant D_4$
- $\{\sigma \in S_n \mid \sigma(1) = 1\} \leqslant S_n$
  - תהי G חבורה סופית אז $Aut(G) \leqslant Sym(G) \cong S_n$
- $SL_n(\mathbb{F}) \leqslant GL_n(\mathbb{F})$ מטריצות עם דטרמיננטה 1 הן חלקיות למטריצות הפיכות.
- $B_n(\mathbb{F}) \leqslant GL_n(\mathbb{F})$ מטריצות משולשיות עליונות עם אלכסון 1 הן חלקיות אף הן להפיכות.
- $O_n(\mathbb{F}) \leqslant GL_n(\mathbb{F})$ חבורת המטריצות האורתוגונליות חלקיות לחבורת המטריצות ההפיכות. $O_n(\mathbb{F}) = \{A \in GL_n(\mathbb{F}) \mid I_n = AA^t = A^tA$.

למה: חיתוך תת־חבורות

לכל קבוצה S ומשפחה $\{H_\alpha \leqslant G \mid \alpha \in S\}$. של תת־חבורה של G אז $\bigcap_{\alpha \in S} H_\alpha \leqslant G$ תת־חבורה.

הערה קטנה: משפחה היא קבוצה של קבוצות ככה שאפשר לזהות כל אחת לפי מספר, אפשר להשתמש בלמה גם בקבוצות כרגיל.

הוכחה.

- $e \in H_\alpha$ לכל $\alpha \in S$ ולכן $e \in \bigcap_{\alpha \in S}$.
- $x, y \in \bigcap_{\alpha \in S}$ אם ורק אם לכל α מתקיים $x, y \in H_\alpha$ ולכן $xy \in H_\alpha$ ובהתאם $xy \in \bigcap_{\alpha \in S}$.

ומצאנו כי זוהי חבורה. □

למשל $SO_n = SL_n(\mathbb{R}) \cap O_n \leqslant GL_n(\mathbb{R})$.

הגדרה: תת־חבורה נוצרת

G חבורה ו־$S \subseteq G$, תת־קבוצה, התת־חבורה הנוצרת על־ידי S מוגדרת להיות:

$$\langle S\rangle = \bigcap_{S\subseteq H\leqslant G} H$$

ונשים לב כי על־פי הלמה האחרונה מתקבל כי זוהי אכן תת־חבורה.

שיעור 3 — 15.5.2024

תת־חבורות

הגדרה: תת־חבורה נוצרת

תהי $S \subseteq G$ תת־קבוצה לחבורה, נגדיר

$$\langle S\rangle = \bigcup_{S\subseteq H\leqslant G} H \leqslant G$$

למה: תת־חבורה מינימלית

$S \subseteq G$ התת־חבורה המינימלית $\langle S\rangle$ היא התת־חבורה המינימלית של G המכילה את S.

קצת קשה לעבור על זה, איזה אפיון נוסף יש לדבר הזה?

טענה: תת־חבורה נוצרת מפורשת

$S \subseteq G$ אז

$$\langle S\rangle = \overline{S} \equiv \{x_1^{\epsilon_1}x_2^{\epsilon_2}\cdots x_n^{\epsilon_n} \mid x_i \in S, \epsilon_i = \pm 1\}$$

הוכחה:

כיוון ראשון: נניח שעבור תת־חבורה H המכילה של S סגיורת H לכפל והופכי גוררת שהקבוצה $\overline{S}$ הנתונה מוכלת ב־H.

מצד שני נראה שזוהי כבר תת־חבורה.

- $1 \in \overline{S}$ מכפלה ריקה.
- $x, y \in \overline{S}$ אז נסמן

$$x = x_1^{\epsilon_1}x_2^{\epsilon_2}\cdots x_n^{\epsilon_n}, y = y_1^{\epsilon_1}y_2^{\epsilon_2}\cdots y_n^{\epsilon_n}, xy = x_1^{\epsilon_1}x_2^{\epsilon_2}\cdots x_n^{\epsilon_n}y_1^{\epsilon_1}y_2^{\epsilon_2}\cdots y_n^{\epsilon_n}$$

- $x \in \overline{S}$ אז

$$x^{-1} = x_1^{-\epsilon_1}x_2^{-\epsilon_2}\cdots x_n^{-\epsilon_n},$$

וידוע כי $(xy)(x^{-1}y^{-1}) = xyx^{-1}y^{-1} = xx^{-1} = 1$

הגדרה: שלמות תת־חבורה יוצרת

אם $\langle S\rangle = G$ אומרים ש־$e - S$ יוצרת את G.

דוגמה: מתקיים $\mathbb{Z} = \langle 1\rangle = \langle -1\rangle$. כקונספט כללי $\langle d\rangle = d\mathbb{Z}$.

מה לגבי $\mathbb{Z}/n$? מתקיים $\mathbb{Z}/n = \langle 1\rangle$.

חבורה ציקלית

חבורה G נקראת **ציקלית** אם היא נוצרת על־ידי איבר אחד, דהינו קיים $x \in G$ כך ש־$G = \langle x\rangle$.

טענה

כל חבורה ציקלית G מקיימת $G = \tilde{=} \mathbb{Z}$ או $G \tilde{=} \mathbb{Z}/n$ הוכחה בתרגיל.

דוגמה:

$G = D_4$.

נגדיר את σ להיות סיבוב בתשעים מעלות, ואת τ להיות היפוך על ציר האיקס.

אז יש לנו את $\langle\sigma\rangle = \{e, \sigma, \sigma^2, \sigma^3\}$

וגם $\langle\tau\rangle = \{e, \tau\}$.

אנחנו יכולים להכפיל כל שני איברים משתי הקבוצות שסימנו עכשיו.

$$D_4 = \langle\sigma, \tau\rangle = \{e, \sigma, \sigma^2, \sigma^3, \tau, \sigma\tau, \sigma^2\tau, \sigma^3\tau\}$$

נראה כי לדוגמה $\tau\sigma = \sigma^3\tau, \sigma^4 = e, \tau^2 = e$.

ונראה כי $\tau\sigma\tau^{-1} = \sigma^3 = \sigma^{-1}$.

טענה: תת־חבורות של Z

לכל $H \leqslant \mathbb{Z}$ קיים $d \geqslant 0$ יחיד כך ש־$H = d\mathbb{Z}$.

הוכחה. אם $H \neq \{0\}$ אז קיים $0 < d \in H$ וניקח את d להיות המינימלי שמקיים את אי־השוויון.

מצד אחד $\langle d\rangle = d\mathbb{Z} \subseteq H$.

מצד שני, עבור $a \in H$ וידוע $a > 0$ אז נכתוב $a = nd + r$ כאשר $0 \leqslant r < d$ שארית.

נקבל כי $r = a - nd \in H$. מהמינימליות של d נובע כי $r = 0$ ולכן $a = nd \in d\mathbb{Z}$. □

יחידות של זה: תרגיל נגלה בהמשך שתת־חבורה של חבורה ציקלית היא בעצמה ציקלית.

הגדרה: gcb

עבור שני מספרים $a, b \in \mathbb{Z}$ שלא שניהם 0 נגדיר $\gcd(a, b) = d$ (Greatest common divisor) מחלק משותף מקסימלי כך שמתקיים: $d \mid a, b$ וגם לשלכל $m \mid a, b$ מתקיים גם $m \mid d$.

הוכחה. $\langle a, b\rangle = d\mathbb{Z}$, לאיזשהו $d \geqslant 0$ יחיד.

נראה ש־$d = \gcd(a, b)$.

מצד אחד $a, b \in d\mathbb{Z}$ ולכן $d \mid a, b$.

מצד שני אם $n \mid a, b$ אז $\{a, b\} \subseteq m\mathbb{Z}$ $d \in d\mathbb{Z} =$. ולכן $m \mid d$ והוא מחלק מקסימלי. □

דוגמה: עבור $2\mathbb{Z} = \langle 2\rangle = \langle 6, 10\rangle$

מסקנה: הלמה של Bézout

לכל $a, b \in \mathbb{Z}$ קיימים $n, m \in \mathbb{Z}$ עבורם $\gcd(a, b) = na + mb$.

מחלקות (Cosets)

הגדרה: מחלקה ימנית ושמאלית

תהי G חבורה ו־$H \leqslant G$ ו־$x \in G$. נגדיר את המחלקה המשלאתי של x על־ידי

$$xH = \{xh \mid h \in H\}$$

ואת המחלקה הימנית של x בהתאם

$$Hx = \{hx \mid h \in H\}$$

תרגיל: להוכיח שהמחלקה הימנית והשמאלית הן איזומורפיות. וזה לא נכון במונואיד.

למה: שיוך למחלקה

$$y \in xH \iff yH = xH$$

הוכחה.

$$y \in xH \iff y = xh \iff x^{-1}y \in H \iff y^{-1}x \in H \iff x \in yH, y \in xH \iff xH = yH$$

□

מסקנה

לכל $x, y \in G$ מתקיים

$xH = yH$ (אם ורק אם $x^{-1}y \in H$).

או $xH \cup yH = \varnothing$

הוכחה. אם $z \notin xH \cup yH$ אז מהלמה הקודמת $xH = ZH = yH$. □

טענה: כיסוי זר

$H \leqslant G$ התת־קבוצות מהצורה xH עבור $x \in G$ מהוות כיסוי זר של G.

הוכחה. נשאר לשים לב $x \in xH$ ולכן כיסוי ומהמסקנה זר. □

טענה:

לכל $x, y \in G$ יש התאמה חד־חד ועל ערכית של קבוצות $yH \xrightarrow{\sim} xH$.

בפרט אם H סופית אז לכל המחלקות אותו גודל, $|xH| = |yH|$.

הוכחה. נגדיר $\varphi : xH \to yH$ על־ידי $\varphi(z) = yx^{-1}z$.

ונגדיר פונקציה חדשה $\psi : yH \to xH$ על־ידי $\psi(z) = xy^{-1}z$.

אז מתקיים $\psi = \varphi^{-1}$ ובהתאם נובע כי φ איזומורפיזם. □

הגדרה: אוסף מחלקות

$H \leqslant G$ אז נסמן

$$G/H = \{xH \mid x \in G\}, H \backslash G = \{Hx \mid x \in G\}$$

אוסף המחלקות השמאליות והימניות בהתאמה.

משפט לאגרנז'

אם G חבורה סופית, אז לכל $H \leqslant G$ מתקיים $|H| \mid |G|$.

הוכחה. ל־G יש כיסוי זר על־ידי מחלקות שמאליות של H ולכן הגודל של $|G| = |H| \cdot |G/H|$.
הגודל של $|G/H| = |G|/|H|$. $\square$

סימון $|G : H| = |G/H|$ **האינדקס** של H ב־G.

דוגמות

המחלקות של $3\mathbb{Z} \leqslant \mathbb{Z}$:

$$3\mathbb{Z} + 0 = 3\mathbb{Z} + 3, 3\mathbb{Z} + 1, 3\mathbb{Z} + 2$$

הקבוצה $\mathbb{Z}/3\mathbb{Z}$ היא השאריות האפשריות בחלוקה לשלוש.

שיעור 4 — 20.5.2024

חזרה

הגדרה: סדר של חבורה

G חבורה ו־$x \in G$ מסומן $o(x)$ הוא המספר הקטן ביותר כך ש־$x^n = e$, $1 \leqslant n \in \mathbb{N}$. או ∞ אם לא קיים n כזה.

למה: סדר

$$ox(x) = |\langle x \rangle|$$

הוכחה. נוכיח שאם $o(x)$ סופי אז

$$\langle x \rangle = \{1, x, x^2, \ldots, x^{o(x)-1}\} \quad (1)$$

ואם $o(x) = \infty$ אז

$$\langle x \rangle = \{1, x, x^2, \ldots,\} \cup \{x^{-1}, x^{-2}, \ldots\} \quad (2)$$

הוכחה ל־(1).

(1) תת־חבורה:

- $x^k \cdot x^m = x^{(m+k) \mod o(x)}$.
- $(x^n)^{-1} = x^{o(x)-n}$.

כל ההאיברים שונים כי אם $x^k = x^m$ ל־$0 \leqslant k < k \leqslant o(x)$ אז

$$1 = x^0 = m^{m-k}$$

ונקבל $1 \leqslant m - k < o(x)$ בסתירה למינימליות של $o(x)$.

הוכחה ל־(2):

אם $H = \langle x \rangle$.

סופיות נתונה בקבוצה.

$$\{1, x, x^2, \ldots\} \subseteq H$$

מסופיות קיימים $0 \leqslant k < m$ עבורם

$$x^k = x^m \implies x^{m-k} = 1$$

ולכן ל־x יש סדר סופי, משובך היונים.

2 תרגיל. □

מסקנה מלאגרנז'

G חבורה סופית, אז לכל $x \in G$ מתקיים

$$o(x) \Big| |G|$$

הבחנה

אם קיים $x\in G$ עבורו $o(x)=|G|$ אז G ציקלית.

טענת בסיס למשפט השאריות הסיני

לכל $a,b\geqslant 1$ זרים אז $\gcd(a,b)=1$, מתקיים

$$\mathbb{Z}/a\times\mathbb{Z}/b\cong\mathbb{Z}/ab$$

הוכחה. נראה שהסדר של $x=(1,1)\in\mathbb{Z}/a\times\mathbb{Z}/b$ הוא ab ונסיק מההבחנה.

ראשית, $x^{ab}=(ab,ab)=(0,0)=1$.

מצד שני, אם $x^n=1$ אז $(n,n)=(0,0)\in\mathbb{Z}/a\times\mathbb{Z}/b$ כלומר

$$0=n\in\mathbb{Z}/a,\qquad 0=n\in\mathbb{Z}/b$$

ולכן $a|n,b|n$, a,b זרים ולכן $ab|n$.

מכיוון ש־$|\mathbb{Z}/a\times\mathbb{Z}/b|=|\mathbb{Z}/a|\cdot|\mathbb{Z}/b|=ab$

נובע ש־$\mathbb{Z}/a\times\mathbb{Z}/b$ ציקלית מגודל ab ולכן איזומורפית ל־$\mathbb{Z}/ab$. $\square$

פעולות של חבורה על קבוצה

נתעסק בחבורות לא אבליות ואיך הן מופיעות כסימטריות פעמים רבות. הסיבה שאנחנו מתעסקים בחבורות היא לראות את הפעולות שלהן על דברים.

הגדרה: פעולה

פעולה של חבורה G על קבוצה X זו פונקציה $\cdot:G\times X\to X$, $(g,x)\mapsto g\cdot x$ כך שמתקיים:

1. $1\cdot x=x$ לכל $x\in X$.
2. $h\cdot(g\cdot x)=(hg)\cdot x$ לכל $x\in X,g,h\in G$.

סימון: $G\circlearrowright X$. באנגלית Group action.

דוגמות לפעולות כאלה

1. S_n פועלת על הקבוצה $X=\{1,2,\ldots,n\}$ על־ידי

$$S_n\times\{1,\ldots n\}\to\{1,\ldots,n\}$$

על־ידי $(\sigma,k)\mapsto\sigma(k)$.

2. $D_n\leqslant S_n$ כפי שהגדרנו בתרגיל.
D_n פועלת על $\{1,2,\ldots,n\}$ באותו אופן כמו S_n, והיא אינטואיטיבית שקולה לביצוע פעולה סימטרית נתונה על מצב מסוים של הריבוע.

3. $GL_n(\mathbb{R})\circlearrowright\mathbb{R}^n$ על־ידי

$$GL_n(\mathbb{R})\times\mathbb{R}^n\to\mathbb{R}^n,\qquad (A,v)\mapsto Av$$

קבלת וקטור ומטריצה וכפל הווקטור במטריצה.

$GL_n(\mathbb{R}) \geqslant O_n(\mathbb{R}) \circlearrowright \mathbb{R}^n$ פעולה אורתוגונלית על וקטורים, שקול למעשה ל-S^{n-1}.

$SL_n(\mathbb{R}) \cap O_2(\mathbb{R}) = SO_2(\mathbb{R})$. אף היא פעולה על $\mathbb{R}$.

הערה: הסימון $O(n) = O_n(\mathbb{R})$ הוא קבוצת האורתוגונליים על $\mathbb{R}$, באופן דומה $SO_n(\mathbb{R})$ קבוצת האורתוגונליים עם דטרמיננטה 1.

4. דוגמה 0: המקרה הטריוויאלי, כל חבורה G ולכל קבוצה X יש את הפעולה הטריוויאלית של G על X והיא

$$g \cdot x = x, \forall g \in G, x \in X$$

הרציונל מאחורי ההגדרה הזאת הוא שאנחנו יכולים לפרק את החבורות מתוך פעולות שאנחנו כבר מכירים ולחקור את התכונות של הפעולות האלה באופן ריגורזי ושיטתי. נשים לב לדוגמה ש-$D_4 \circlearrowright \{D_1, D_2\}$, אנחנו יכולים לחקור את המקרה היחסית טריוויאלי הזה של סימטריה גאומטרית על־ידי הגדרת הפעולה המתאימה.

הגדרה: אינבולוציה

נבחן את הפעולה של $\mathbb{Z}/2$ על X. האיבר הנייטרלי לא עושה כלום ולכן קל להגדיר אותו, יש להגדיר פעולה רק עבור איבר לא נייטרלי.

זה אותו דבר בגדול כמו פונצקיה $\tau : X \to X$ שמקיימת $\tau \circ \tau = Id_X$, זאת שכן

$$\mathbb{Z}/2 \times X \to X, \qquad g \cdot x \mapsto \begin{cases} x, & g = 0 \\ \tau(x), & g = 1 \end{cases}$$

לפונקציה כזאת קוראים אינבולוציה, פעולה שריבועה הוא Id, באנגלית Involution, וכבר ראינו פונקציות רבות כאלה.

כדוגמה יש לנו לפחות שלוש פעולות $\mathbb{Z}/2$ על $\mathbb{R}^2$ כאלה

$$\tau(\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}) = \begin{bmatrix} -x \\ y \end{bmatrix}, \qquad \tau(\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}) = \begin{bmatrix} x \\ -y \end{bmatrix}, \qquad \tau(\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}) = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}$$

הגדרה: הפעולה הרגולרית

G חבורה, **הפעולה הרגולרית (השמאלית)** של G על G שנתונה על־ידי

$$g \cdot x = gx$$

פעולה המוגדרת על־ידי הכפל של החבורה. זוהי כמובן פעולה והסימון הוא $G \circlearrowright G$.

האם פעולה ימנית גם עומדת בהגדרת הפעולה?

נבדוק את $G \times G \to G$ המוגדרת על־ידי $(g, x) \mapsto xg$:

נבדוק אסוציאטיביות

$$h \cdot (g \cdot x) = h \cdot (xg) = (xg)h, \quad (hg) \cdot x = x(hg), \quad (xg)h \neq x(hg)$$

ומצאנו כי הביטויים לא שווים ואין שמירה על אסוציאטיביות כחלק מהגדרת הפעולה, ולכן כמובן זוהי לא פעולה.

נשתמש במקום זאת בהופכית ונגדיר $(g, x) \mapsto xg^{-1}$

פעולה זאת היא אכן פעולה מוגדרת והיא נקראת **הפעולה הרגולרית הימנית**.

יש עוד פעולה מעניינת של חבורה על עצמה, על־ידי הצמדה

הגדרה: הצמדה

$$G \times G \to G, \quad (g, x) \mapsto xgx^{-1}$$

היא פעולת ההצמדה, נחקור אותה בתרגיל

בהינתן פעולה של $X \circlearrowleft G$ נגדיר פונצקיה $f : G \to Sym(X) \subseteq End(X)$ על־ידי

$$f(g)(x) = g \cdot x$$

זאת שכן $G \times X \to X$ שקול ל־$G \to \{X \to X\}$.

טענה: הצמדה היא הומומורפיזם

f היא הומומורפיזם של חבורות.

הוכחה.

$$f(hg)(x) = (hg) \cdot x = h \cdot (g \cdot x) = f(h)(g \cdot x) = f(h)(f(g)(x)) = (f(h) \cdot f(g))(x)$$

$\square$

למה $f(g) \in Sym(X)$?

כי $f(g^{-1}) \cdot f(g) = f(g^{-1}g) = f(1) = Id$. גם $f(g) \cdot f(g^{-1}) = f(gg^{-1}) = f(1) = Id$.

בשיעור הבא נגדיר המון דברים על פעולות על קבוצות, אז צריך להבין את זה ואת הדוגמות באופן מאוד כבד ושלם.