מבוא לתורת הקבוצות

משה קמנסקי

29 במאי 2024

1 מבוא

מטרת הקורס היא לתת מבוא לתורה של המבנים המתמטיים הכי בסיסיים, קבוצות. קבוצה A מאופיינת על-ידי אוסף האיברים ששייכים אליה: לכל עצם x, ניתן לשאול: האם x שייך ל-A? אנחנו נסמן את הטענה ש-x שייך ל-A ב-$x \in A$. הנה כמה מהשאלות בהן נתמקד:

1.1 איזה מבנים מעניינים ניתן לתאר באמצעות קבוצות?

1. תכונות כתתי קבוצות
2. בניית קבוצות חדשות מקבוצות קיימות
3. יחסים ופעולות

1.2 איך אפשר לעבוד עם קבוצות אינסופיות?

1. קבוצות סופיות ואינסופיות
2. גדלים של קבוצות אינסופיות
3. על מה אפשר לעשות אינדוקציה?

1.3 מהן קבוצות?

1. הגישה האקסיומטית
2. הגדרה ותכונות של קבוצות מוכרות

1.4 כמה שאלות

1. האם לכל מרחב וקטורי יש בסיס?
2. האם קיים מספר ממשי שאינו אלגברי?
3. האם קיימת פונקציה $f : \mathbb{R} \to \mathbb{R}$ שהיא חיבורית אבל לא רציפה?
4. האם אפשר להגדיר באופן סביר את האורך של כל תת-קבוצה של קטע ממשי חסום?
5. האם כל פונקציה מהטבעיים לטבעיים ניתנת לחישוב על-ידי תכנית מחשב?
6. האם קיימת קבוצה של נקודות במישור שכל ישר פוגש בשתי נקודות בדיוק?
7. האם המישור הוא איחוד של מעגלים זרים? מה לגבי המרחב התלת-מימדי?

2 תורת קבוצות אלמנטרית (תזכורת)

2.1 פעולות בסיסיות

1. הכלה
2. חיתוך, איחוד, הפרש, הפרש סימטרי
3. קבוצת חזקה

2.2 גרפים

מכפלה קרטזית, יחסים, פונקציות, תחום, תמונה, הרכבה, יחס הפוך

הגדרה 2.2.1. *גרף* הוא זוג $\Gamma = \langle X, R \rangle$ כאשר X קבוצה ו-$R \subseteq X \times X$ יחס מעל X. גרף

הגדרה 2.2.2. נניח ש-$\langle A, R \rangle$ ו-$\langle B, S \rangle$ שני גרפים ו-$f : A \to B$ פונקציה. אז f נקראת *העתקה* (של גרפים) אם לכל $a, a' \in A$, אם aRa' אז $f(a)Sf(a')$. אם בנוסף גם הכיוון השני נכון (כלומר לכל $a, a' \in A$, אם $f(a)Sf(a')$ אז aRa'), אז f נקראת *שיכון*. אם f העתקה שהפיכה כפונקציה, וההופכית היא גם העתקה של גרפים, אז f נקראת *איזומורפיזם*.

העתקה

שיכון

איזומורפיזם

2.3 יחסי שקילות, מנות

הגדרה 2.3.1. *יחס שקילות* על קבוצה A הוא יחס סימטרי, טרנזיטיבי ורפלקסיבי מעל A. יחס שקילות

דוגמה 2.3.2. A קבוצת המשולשים במישור שאינם שווי שוקיים. יחס החפיפה על A הוא יחס שקילות, וכך גם יחס הדמיון. $\diamondsuit$

דוגמה 2.3.3. נניח ש-n מספר שלם, ו-$A = \mathbb{Z}$. נגדיר יחס E_n על $\mathbb{Z}$ על-ידי: mE_nk אם $n \mid m-k$, כאשר יחס החלוקה $p \mid q$ (כלומר "p מחלק את q") מתקיים אם יש l שלם עבורו $q = pl$. אז לכל n שלם, E_n יחס שקילות (תרגיל) $\diamondsuit$

אינטואיטיבית, יחס שקילות על A מבטא את הרעיון שאנחנו רוצים לזהות איברים שונים של A. דרך אחת שזה יכול לקרות היא שערכי פונקציה מסוימת על האיברים הללו הם זהים.

הגדרה 2.3.4. אם $f : A \to B$ פונקציה, *הגרעין* של f הוא היחס $\ker(f) = \{\langle a_1, a_2\rangle \in A \times A \mid f(a_1) = f(a_2)\}$. הגרעין

תרגיל 2.3.5. הוכיחו שלכל $f : A \to B$, הגרעין של f הוא יחס שקילות.

דוגמה 2.3.6. נניח ש-$n > 0$ שלם, ונסמן $C_n = \{0, \ldots, n-1\}$. נגדיר $r_n : \mathbb{Z} \to C_n$ על-ידי: $r_n(m)$ הוא השארית של m בחלוקה ב-n (כלומר, המספר היחיד $k \in C_n$ כך ש-$m-k$ מתחלק ב-n). אז $\ker(r_n) = E_n$ מדוגמה 2.3.3 (תרגיל). $\diamondsuit$

נמשיך להשתמש בסימונים r_n, C_n ו-E_n מהדוגמה האחרונה גם בהמשך.

דוגמה 2.3.7. אם A קבוצת המשולשים במישור שאינם שווי שוקיים, נגדיר את $f : A \to B$ להיות הפונקציה שמתאימה לכל משולש את קבוצת אורכי הצלעות שלו (הבחירה במשולשים שאינם שווי שוקיים היא כדי להבטיח שהקבוצה הזו היא בת שלושה איברים בדיוק, ולכן ניתן לשחזר את אורכי כל הצלעות בצורה יחידה). לפי משפט החפיפה צלע-צלע-צלע, f היא העתקת מנה עבור יחס החפיפה. $\diamondsuit$

תרגיל 2.3.8. מצאו פונקציה f על אותה קבוצת משולשים כך ש-$\ker(f)$ הוא יחס הדמיון

יחסי שקילות מהצורה $\ker(f)$ הם נוחים במיוחד: על מנת לקבוע האם a_1 ו-a_2 שקולים, מספיק לחשב את הערכים $f(a_i)$. לכן, מעניין לשאול אילו יחסי שקילות הם מהצורה הזו. מסתבר שהתשובה היא: כולם.

משפט 2.3.9. *לכל יחס שקילות E על קבוצה A קיימת פונקציה $f : A \to B$ שהיא על, כך ש-$\ker(f) = E$. כל פונקציה כזו נקראת העתקת מנה עבור E.* העתקת מנה

על-מנת להוכיח את המשפט, נציג את המינוח הבא: אם E יחס שקילות על A, ו-$a \in A$, *מחלקת השקילות* של a היא הקבוצה $[a]_E = \{a' \in A \mid aEa'\}$. מחלקת השקילות

הוכחה. נגדיר $B = \{[a]_E \mid a \in A\}$ ו-$f : A \to B$ על ידי $f(a) = [a]_E$. $\square$

תרגיל 2.3.10. השלימו את ההוכחה (הנקודה העיקרית היא ש-$[a_1]_E = [a_2]_E$ אם ורק אם $a_1 E a_2$).

הערה 2.3.11. בניגוד למקובל במקומות אחרים, אנחנו לא נשתמש במפורש בבנייה שמופיעה בהוכחת המשפט (כלומר, בקבוצת מחלקות השקילות) אלא רק במשפט עצמו. הסיבה היא שהמידע הנוסף שהבנייה הזו מספקת אינו שימושי לרוב, ומאידך הגמישות שבבחירת העתקת מנה כלשהי היא לעתים שימושית ויותר אינטואיטיבית. למשל, ראינו את העתקת המנה r_n עבור היחס E_n, שהיא יותר טבעית מהבניה בהוכחה.

כאמור, ניתן לחשוב על יחס שקילות E על A כעל מושג מוחלש של שוויון בין איברי A. מנקודת המבט הזו, העתקת מנה $f: A \to B$ "שוכחת" את המידע הלא רלוונטי על איברי A, והופכת את השוויון המוחלש לשוויון ממש: aEa' אם ורק אם $f(a) = f(a')$. לכן, ניתן לחשוב על איבר $b \in B$ כמחזיק "המידע הרלוונטי" אודות $a \in A$ עבורו $f(a) = b$ (ההנחה ש-f מבטיחה שלכל $b \in B$ אכן קיים a כזה). לכן, מעניין להבין איזה מידע מעניין על A מושרה ל-B. נדגים זאת באמצעות השימוש הבא.

שלשה פיתגורית

שלשה פיתגורית היא שלשה a, b, c של מספרים טבעיים כך ש-$a^2 + b^2 = c^2$ (לכן, הם אורכים של צלעות משולש ישר זווית). אנחנו רוצים להוכיח את הטענה הבאה:

טענה 2.3.12. *לא קיימת שלשה פיתגורית בה אורכי הניצבים a, b הם אי-זוגיים.*

על מנת להוכיח את הטענה הזו, נשתמש בטענה הבאה:

טענה 2.3.13. *נניח ש-n טבעי חיובי, ו-$\pi: \mathbb{Z} \to B$ העתקת מנה עבור E_n.* **אז** *קיימות פעולות יחידות $\oplus$ ו-$\odot$ על B המקיימות לכל $m, k \in \mathbb{Z}$ את השוויונות $\pi(m+n) = \pi(m) \oplus \pi(n)$ ו-$\pi(mn) = \pi(m) \odot \pi(n)$.*

נוכיח את הטענה הזו בהמשך. בינתיים, נשים לב שהתנאים בטענה מאפשרים לחשב את הפעולות על כל זוג איברים: למשל, כדי לחשב את $b_1 \oplus b_2$, עלינו לבחור $a_i \in A$ כך ש-$\pi(a_i) = b_i$, ולחשב את $\pi(a_1 + a_2)$. הטענה מבטיחה שהתשובה אינה תלויה בבחירה של a_i. תכונות של הפעולות הללו גם ניתן להסיק מתוך הטענה. למשל:

תרגיל 2.3.14. הוכיחו שלכל $u, v, w \in B$ מתקיים $u \oplus v = v \oplus u$, $u \odot v = v \odot u$ ו-$u \odot (v \oplus w) = (u \odot v) \oplus (u \odot w)$ (במונחים של טענה 2.3.13)

עבור $n = 4$ ו-$\pi = r_4$ כמו בדוגמא 2.3.6, אפשר בקלות לחשב את טבלת ה"חיבור" וה"כפל" ב-C_4, קבוצה בת ארבעה איברים. אנחנו בעיקר רוצים לשים לב שאם $u \in C_4$ זוגי (כלומר 0 או 2) אז $u \odot u = 0$ ואחרת $u \odot u = 1$. עכשיו אפשר להוכיח את טענה 2.3.12:

הוכחת טענה 2.3.12. נניח בשלילה שקיימים מספרים אי-זוגיים a, b ושלם c כך ש-$a^2 + b^2 = c^2$. נחשב את r_4 בשני הצדדים:

$$\begin{aligned} r_4(c) \odot r_4(c) = r_4(c \cdot c) = r_4(a \cdot a + b \cdot b) = \\ (r_4(a) \odot r_4(a)) \oplus (r_4(b) \odot r_4(b)) = 1 \oplus 1 = 2 \in C_4 \end{aligned}$$

כאשר השוויון הלפני אחרון נובע מההנחה ש-a, b אי-זוגיים, ומהחישוב שעשינו לפני ההוכחה. אותו חישוב מראה שהגענו לסתירה, שכן צד שמאל חייב להיות 0 או 1. □

על-מנת להשלים את ההוכחה, עלינו להוכיח את טענה 2.3.13. נשים לב ראשית שהטענה אינה טריוויאלית: ישנן פעולות על השלמים שלא מקיימות את התכונה המקבילה.

תרגיל 2.3.15. נסמן $m \star k = m^{|k|}$ עבור מספרים שלמים m, k. הוכיחו שלא קיימת פעולה $\circledast$ על C_4 כך שלכל $m, k \in \mathbb{Z}$ מתקיים $r_4(m \star k) = r_4(m) \circledast r_4(k)$.

אנחנו נוכיח את טענה 2.3.13 כמסקנה מטענה כללית על יחסי שקילות. אנחנו מתעניינים בטענה מהצורה הבאה: נתון יחס שקילות E על קבוצה A, עם העתקת מנה $\pi : A \to B$. יש לנו "מבנה מעניין" על A, ואנחנו מעוניינים להבין באיזה תנאי הוא "משרה" מבנה דומה על B. בטענה 2.3.13 המבנה המעניין היה פעולות החיבור והכפל. באופן כללי, זה יכול להיות למשל פונקציה מ-A, תת-קבוצה של A, יחס על A וכו'.

אנחנו נתמקד ראשית במקרה הפשוט של פונקציה. נתונה לנו פונקציה $g : A \to C$ (כאשר C קבוצה כלשהי). מתי הפונקציה הזו "משרה" פונקציה על B? אנחנו שואלים האם קיימת פונקציה $\bar{g} : B \to C$ כך שלכל $a \in A$ מתקיים $g(a) = \bar{g}(\pi(a))$ (כלומר, האם הגודל g שאנחנו מודדים על איברי A תלוי בעצם רק במידע שבאמת מעניין אותנו, כלומר בתמונה של האיבר ב-B). נשים לב שאם זה המצב, ו-a' שקול ל-a, אז $g(a) = \bar{g}(\pi(a)) = \bar{g}(\pi(a')) = g(a')$. לכן, מצאנו תנאי הכרחי. מסתבר שהוא גם תנאי מספיק:

משפט 2.3.16. *נניח ש-E יחס שקילות על קבוצה A, עם העתקת מנה $\pi : A \to B$, ונניח ש-$g : A \to C$ פונקציה כלשהי. אז התנאים הבאים שקולים:*

1. *קיימת פונקציה $\bar{g} : B \to C$ כך ש-$g = \bar{g} \circ \pi$.*
2. *לכל $a, a' \in A$, אם aEa' אז $g(a) = g(a')$ (במילים אחרות, $E \subseteq \ker(g)$).*

אם התנאים מתקיימים, אז $\bar{g}$ יחידה.

סוף הרצאה 1, 1 במאי 2024

הוכחה. כיוון אחד ראינו בדיוק לפני הניסוח של המשפט. בכיוון השני, נגדיר

$$\bar{g} = \{\langle \pi(a), g(a) \rangle \mid a \in A\}$$

נוכיח ש-$\bar{g}$ פונקציה: אם $\langle u, v \rangle$ ו-$\langle u, w \rangle$ שייכים ל-$\bar{g}$ אז קיים $a \in A$ כך ש-$u = \pi(a)$ ו-$v = g(a)$ וקיים $a' \in A$ כך ש-$u = \pi(a')$ ו-$w = g(a')$. כיוון ש-$\pi(a) = u = \pi(a')$, מתקיים aEa' ולכן לפי ההנחה $g(a) = g(a')$, כלומר $v = w$.

השוויון $g = \bar{g} \circ \pi$ נובע ישירות מהבניה. העובדה ש-$\bar{g}$ מוגדרת על B ויחידה נובעת מכך ש-π על: הערך של $\bar{g}$ על כל איבר $b \in B$ נקבע על-ידי התנאי $g = \bar{g} \circ \pi$. □

למשפט יש מספר מסקנות והכללות שימושיות:

מסקנה 2.3.17. *נניח ש-E יחס שקילות על X, עם העתקת מנה $\pi_X : X \to \bar{X}$, ו-F יחס שקילות על Y, עם העתקת מנה $\pi_Y : Y \to \bar{Y}$. נניח ש-$h : Y \to X$ פונקציה. אז שני התנאים הבאים שקולים:*

1. *קיימת פונקציה $\bar{h} : \bar{Y} \to \bar{X}$ כך שלכל $y \in Y$ מתקיים $\pi_X(h(y)) = \bar{h}(\pi_Y(y))$.*
2. *לכל $y, y' \in Y$, אם yFy' אז $h(y)Eh(y')$.*

הוכחה. נגדיר $g : Y \to \bar{X}$ על-ידי $g = \pi_X \circ h$. אז לכל $y, y' \in Y$ מתקיים: $g(y) = g(y')$ אם ורק אם $h(y)Eh(y')$. לכן, לפי משפט 2.3.16, התנאי השני שקול לקיומה של פונקציה $\bar{h} : \bar{Y} \to \bar{X}$ כך ש-$\bar{h} \circ \pi_Y = g = \pi_X \circ h$, כנדרש. □

דוגמה 2.3.18. נניח ש-$X=Y=\mathbb{Z}$, $E=E_2$ ו-$F=E_6$, עם העתקות מנה r_2 ו-r_6, כמו בדוגמא 2.3.6, ונניח ש-$h:\mathbb{Z}\to\mathbb{Z}$ נתונה על-ידי $h(n)=7n$. אם nFn' אז $n-n'$ מתחלק ב-6. לכן $h(n)-h(n')=7(n-n')$ מתחלק ב-6 ולכן גם ב-2, כלומר $h(n)Eh(n')$. המסקנה מבטיחה שקיימת פונקציה (יחידה) $\bar{h}:C_6\to C_2$ עם התכונה: $\bar{h}(r_6(n))=r_2(7n)$ לכל $n\in\mathbb{Z}$. במלים אחרות, הזוגיות של $7n$ (שנמדדת על-ידי r_2) תלויה רק בשארית של n ביחס ל-6: אם השארית הזו ידועה, אנחנו יודעים האם $7n$ זוגי. לא קשה לחשב את $\bar{h}$: לכל $k\in C_6$ מתקיים $\bar{h}(k)=1$ אם ורק אם k אי-זוגי (כמספר טבעי).

אפשר גם לחשוב על אותה דוגמא כאשר מחליפים בין E ו-F. במקרה הזה, אין $\bar{h}$ המקיימת $\bar{h}(r_2(n))=r_6(7n)$: השארית של $7n$ ביחס ל-6 לא תלויה רק בזוגיות של n, איבדנו יותר מדי מידע. $\diamondsuit$

מסקנה 2.3.19. *נניח ש-E יחס שקילות על קבוצה X עם העתקת מנה $\pi:X\to\bar{X}$, וש-$h:X\times X\to X$ פונקציה. אז התנאים הבאים שקולים:*

1. *קיימת פונקציה (יחידה) $\bar{h}:\bar{X}\times\bar{X}\to\bar{X}$ כך שלכל $x_1,x_2\in X$ מתקיים $\bar{h}(\pi(x_1),\pi(x_2))=\pi(h(x_1,x_2))$.*
2. *לכל $x_1,x_1',x_2,x_2'\in X$, אם x_1Ex_1' ו-x_2Ex_2' אז $h(x_1,x_2)Eh(x_1',x_2')$.*

לפני שנוכיח את המסקנה, נסיק ממנה את טענה 2.3.13.

הוכחת טענה 2.3.13. ניקח $X=\mathbb{Z}$ עם $E=E_n$ ו-$h:\mathbb{Z}\times\mathbb{Z}\to\mathbb{Z}$ פונקציית החיבור $h(m,k)=m+k$. התנאי הראשון במסקנה 2.3.19 מבטיח פונקציה (יחידה) $\bar{h}:B\times B\to B$ כך שלכל $m,k\in\mathbb{Z}$ מתקיים $\pi(m+k)=\pi(h(m,k))=\bar{h}(\pi(m),\pi(k))$, כלומר $\oplus=\bar{h}$ היא בדיוק הפונקציה שאנחנו מחפשים.

המסקנה אומרת שקיומה של הפונקציה הזו שקול לתנאי שאם mEm' וגם kEk' אז $m+kEm'+k'$. ההנחה במקרה שלנו היא ש-$m-m'$ מתחלק ב-n וגם $k-k'$ מתחלק ב-n. אם זה אכן המצב, אז גם הסכום שלהם $m-m'+k-k'=m+k-(m'+k')$ מתחלק ב-n, כנדרש.

ההוכחה עבור כפל דומה (תרגיל). $\square$

סוף הרצאה 2, 6 במאי, 2024

עכשיו נוכיח את המסקנה

הוכחת מסקנה 2.3.19. נסמן ב-F את היחס על $Y=X\times X$ הנתון על-ידי $\langle x_1,x_2\rangle F\langle x_1',x_2'\rangle$ אם x_1Ex_1' וגם x_2Ex_2'. אז F הוא הגרעין של הפונקציה $\pi_Y:X\times X\to\bar{X}\times\bar{X}$ הנתונה על-ידי $\pi_2(x_1,x_2)=\langle\pi(x_1),\pi(x_2)\rangle$ (בפרט, הוא יחס שקילות), וכיוון ש-π_Y על, זוהי העתקת מנה עבור F. עכשיו הטענה נובעת מיידית ממסקנה 2.3.17. $\square$

מסקנה 2.3.20. *נניח ש-E יחס שקילות על קבוצה X עם מנה $\pi:X\to\bar{X}$, ונניח ש-$S\subseteq X$ תת-קבוצה. אז התנאים הבאים שקולים:*

1. *קיימת תת-קבוצה $\bar{S}\subseteq\bar{X}$ כך שלכל $x\in X$ מתקיים: $x\in S$ אם ורק אם $\pi(x)\in\bar{S}$.*

2. *לכל* $x,x'\in X$*, אם* xEx' *אז* $x\in S$ *אם ורק אם* $x'\in S$.

הוכחה. נגדיר $C=\{0,1\}$, ו-$g:X\to C$ *הפונקציה המציינת* של S, כלומר: $g(x)=1$ אם ורק אם $x\in S$. אז התנאי השני שקול לתנאי השני עבור g במסקנה 2.3.17. לכן, לפי אותה מסקנה, הוא שקול לקיומה של פונקציה $\bar{g}:\bar{X}\to C$ כך ש-$g(x)=\bar{g}(\pi(x))$ לכל $x\in X$. נגדיר $\bar{S}=\bar{g}^{-1}[\{1\}]$. אז התנאי האחרון שקול לתנאי הראשון במסקנה (תרגיל). $\square$

דוגמה 2.3.21. נניח שאני יודע מהי השארית של מספר שלם m ביחס ל-7. האם אני יכול לגלות אם m הוא זוגי? התשובה היא לא: ל-3 ול-10 זוגיות שונה, אבל אותה שארית ביחס ל-7. זהו המקרה של מסקנה 2.3.20 בו $S\subseteq X=\mathbb{Z}$ קבוצת הזוגיים.

התשובה שונה אם מחליפים את 7 ב-6: לכל שני מספרים שההפרש ביניהם מתחלק ב-6 אותה זוגיות. הקבוצה $\bar{S}\subseteq C_6$ מהמסקנה היא, במקרה הזה, $\{0,2,4\}$. $\diamondsuit$

הערה 2.3.22. נשים לב לעקרון הכללי שהשתמשנו בו בהוכחת מסקנה 2.3.20: יש התאמה טבעית בין תתי-קבוצות S של קבוצה X, ופונקציות $c:X\to\{0,1\}$. ההתאמה נתונה על-ידי: לכל תת-קבוצה $S\subseteq X$ מתאימה הפונקציה $c_S:X\to\{0,1\}$ המוגדרת כ-$c_S(x)=1$ אם ורק אם $x\in S$. הפונקציה c_S נקראת *הפונקציה המציינת* של S. בכיוון ההפוך, אם $c:X\to\{0,1\}$ פונקציה כלשהי, מתאימה לה קבוצה $S_c=\{x\in X\mid c(x)=1\}$. הפונקציה המציינת

תרגיל 2.3.23. הוכיחו (בסימונים של הערה 2.3.22) שלכל $S\subseteq X$ מתקיים $S=S_{c_S}$, ולכל $c:X\to\{0,1\}$ מתקיים $c=c_{S_c}$ (כלומר, שתי ההתאמות הפוכות אחת לשנייה).

לסיום, נאמר מילה על יחידות המנה והעתקת המנה. כפי שכבר ראינו, בהינתן יחס שקילות E על X, ישנן לרוב הרבה העתקות מנה עבור E (וראינו שלעתים זה מועיל). למרות זאת, נסביר בתרגיל הבא שניתן לזהות כל שתיים מהן באופן יחיד.

תרגיל 2.3.24. נניח ש-E יחס שקילות על קבוצה X, עם העתקת מנה $\pi:X\to\bar{X}$.

1. נניח ש-$h:\bar{X}\to\bar{X}$ פונקציה המקיימת $h\circ\pi=\pi$. הוכיחו ש-h היא הזהות.
2. נניח ש-$\pi_1:X\to\bar{X}_1$ העתקת מנה נוספת עבור E. הוכיחו שקיימת פונקציה יחידה $f:\bar{X}\to\bar{X}_1$ כך ש-$f\circ\pi=\pi_1$, ופונקציה יחידה $g:\bar{X}_1\to\bar{X}$ כך ש-$g\circ\pi_1=\pi$ (רמז: משפט 2.3.16).
3. הוכיחו ש-f ו-g הפוכות אחת לשניה.

בגלל התרגיל הזה, לרוב מתייחסים אל העתקת מנה שונות (עבור יחס שקילות נתון) כאל אובייקט יחיד, וקוראים לו העתקת המנה.

2.3.25 מנות במרחבים וקטוריים

נניח ש-$T:U\to V$ העתקה לינארית בין שני מרחבים וקטוריים מעל שדה k. כמו לכל פונקציה, ל-T יש גרעין $E=\ker(T)=\{\langle u_1,u_2\rangle\mid u_1,u_2\in U,T(u_1)=T(u_2)\}$, אבל המבנה הלינארי מאפשר לרשום את התנאי האחרון כ-$T(u_1-u_2)=T(u_1)-T(u_2)=0$, כלומר $u_1-u_2\in\underline{\ker}(T)$, כאשר $\underline{\ker}(T)=\{u\in U\mid T(u)=0\}\subseteq U$ היא הקבוצה שנקראת

הגרעין של T באלגברה לינארית. זוהי בדיוק מחלקת השקילות של 0 ביחס ל-E. אז המידע של E ושל $\underline{\ker}(T)$ שקול עבור העתקות לינאריות.

איזה תתי-קבוצות W של U הן מהצורה $\underline{\ker}(T)$ עבור העתקה לינארית T כלשהי? האבחנה הבסיסית היא שאם W היא גרעין של העתקה לינארית, אז W תת-מרחב וקטורי. מסתבר, שזו ההגבלה היחידה.

משפט 2.3.26. *נניח ש-W תת-מרחב וקטורי של מרחב וקטורי U מעל שדה k. אז קיים מרחב וקטורי V והעתקה לינארי $T : U \to V$ כך ש-T על ו-$\underline{\ker}(T) = W$.*

הוכחה. נגדיר יחס E על U על-ידי: $u_1 E u_2$ אם $u_1 - u_2 \in W$. זהו יחס שקילות (תרגיל). לפי משפט 2.3.9, קיימת ל-E העתקת מנה $T : U \to V$ (בפרט T על). עלינו להגדיר מבנה של מרחב וקטורי על V, עבורו T תהיה העתקה לינארית. ביתר פירוט, עלינו להראות:

1. קיימת פעולה $\oplus : V \times V \to V$ כך שלכל $u_1, u_2 \in U$ מתקיים $T(u_1 + u_2) = T(u_1) \oplus T(u_2)$
2. לכל $c \in k$, קיימת פונקציה $f_c : V \to V$ (הכפלה בסקלר c), המקיימת לכל $u \in U$ ש-$T(cu) = f_c(T(u))$.
3. V ביחד עם הפעולות $\oplus$ והכפל בסקלרים שנתון על-ידי $c \cdot_V v = f_c(v)$ לכל $c \in k$ ו-$v \in V$ מקיימים את ההגדרה של מרחב וקטורי מעל k.

על מנת להוכיח את (1), נשתמש במסקנה 2.3.19, עבור הנתונים $X = U$, יחס השקילות E שהגדרנו, $\bar{X} = V$ ו-$\pi = T$, כאשר $h : X \times X \to X$ פונקציית החיבור של U. התנאי הראשון באותה מסקנה מבטיח שקיימת פונקציה $\bar{h} = \oplus : V \times V \to V$ כך שלכל $u_1, u_2 \in U$ מתקיים $T(u_1) \oplus T(u_2) = \bar{h}(T(u_1), T(u_2)) = T(u_1 + u_2)$, כלומר בדיוק תנאי (1) שלנו. לכן, מספיק להוכיח את התנאי השקול באותה מסקנה, כלומר שלכל $u_1, u_1', u_2, u_2' \in U$, אם $u_1 E u_1'$ וגם $u_2 E u_2'$ אז $u_1 + u_2 E u_1' + u_2'$. לפי הגדרת E, ההנחה פירושה ש-$u_1 - u_1' \in W$ ו-$u_2 - u_2' \in W$. כיוון ש-W תת-מרחב, הוא סגור לחיבור, ולכן גם $u_1 + u_2 - (u_1' + u_2') = (u_1 - u_1') + (u_2 - u_2') \in W$, כנדרש (השוו להוכחת טענה 2.3.13).

באופן דומה, כדי להוכיח את (2), נקבע $c \in k$, ונשתמש במסקנה 2.3.17 עבור $X = Y = U$, $\pi_X = \pi_Y = T$ ו-$\bar{X} = \bar{Y} = V$, כאשר h היא פונקצית הכפל בסקלר ב-U, כלומר $h(u) = cu$. עלינו לבדוק שאם uEu' אז $cuEcu'$, כלומר שאם $u - u' \in W$ אז גם $cu - cu' = c(u - u') \in W$, וזה נובע מהעובדה שתת-המרחב W סגור לכפל בסקלר c.

תכונות המרחב הווקטורי נובעות בקלות ממה שכבר הוכחנו. למשל, על-מנת להוכיח ש-$v_1 \oplus v_2 = v_2 \oplus v_1$ לכל $v_1, v_2 \in V$, נבחר $u_1, u_2 \in U$ כך ש-$T(u_i) = v_i$ (זה אפשרי משום ש-T על). אז

$$v_1 \oplus v_2 = T(u_1) \oplus T(u_2) = T(u_1 + u_2) = \\ = T(u_2 + u_1) = T(u_2) \oplus T(u_1) = v_2 \oplus v_1$$

הוכחת יתר האקסיומות דומה. $\square$

תרגיל 2.3.27. השלימו את ההוכחה

מרחב מנה

מרחב V כמו במשפט נקרא *מרחב מנה* של U ב-W, ומסומן ב-U/W. ההעתקה T נקראת העתקת מנה. כמו במקרה של קבוצות, מרחב המנה והעתקת המנה אינם יחידים, אבל הם יחידים עד כדי העתקה *לינארית* יחידה:

תרגיל 2.3.28. נניח ש-$W \subseteq U$, ו-$T_1 : U \to V_1$ ו-$T_2 : U \to V_2$ שתי העתקות מנה עבור W. הוכיחו שקיימת העתקה לינארית הפיכה יחידה $S : V_1 \to V_2$ כך ש-$S \circ T_1 = T_2$.

סוף הרצאה 3, 8 במאי, 2024

2.4 יחסי סדר

יחס סדר

קבוצה סדורה חלקית (קס"ח)

הגדרה 2.4.1. *יחס סדר* על קבוצה X הוא יחס רפלקסיבי, אנטי-סימטרי וטרנזיטיבי מעל X. *קבוצה סדורה חלקית (קס"ח)* היא זוג $\langle X, R\rangle$ כאשר X קבוצה לא ריקה, ו-R יחס סדר מעל X.

דוגמה 2.4.2. קבוצות המספרים $\mathbb{N}$, $\mathbb{Z}$ ו-$\mathbb{Q}$ עם הסדר הרגיל $R = \leqslant$. $\diamondsuit$

דוגמה 2.4.3. אם A קבוצה כלשהי, אז $\subseteq$ הוא יחס סדר על קבוצת החזקה $X = \mathcal{P}(A)$. $\diamondsuit$

אם $\langle X, R\rangle$ קס"ח ו-$Y \subseteq X$, אז הצמצום $R\restriction_Y = R \cap (Y \times Y)$ הוא יחס סדר על Y. לעתים נמשיך לסמן R במקום $R\restriction_Y$.

דוגמה 2.4.4. המקרים הפרטיים הבאים עשויים להיות מעניינים: אם A קבוצה, נגדיר $\mathcal{F}(A) = \{B \subseteq A \mid B \text{סופית}\}$ ו-$\Phi(A) = \mathcal{F}(A) \cup \{B \subseteq A \mid A \setminus B \in \mathcal{F}(A)\}$ $\diamondsuit$

דוגמה 2.4.5. יחס החלוקה $|$ הוא יחס סדר על $\mathbb{N}$, אך אינו סדר חלקי על $\mathbb{Z}$: מתקיים $1 \mid -1$ ו-$-1 \mid 1$, למרות שהם שונים. $\diamondsuit$

דוגמה 2.4.6. נניח ש-A קבוצה. נגדיר יחס $\preceq$ על $X = \mathcal{P}(A)$ על-ידי: $B \preceq C$ אם יש קבוצה סופית D כך ש-$B \subseteq C \cup D$ (נאמר ש-B "כמעט מוכלת" ב-C במצב הזה). היחס $\preceq$ רפלקסיבי וטרנזיטיבי, אך אינו אנטי-סימטרי: למשל, לכל שתי קבוצות סופיות B, C מתקיים $B \preceq C$.

אינטואיטיבית, אם $B \preceq C$ ו-$C \preceq B$, כלומר כל אחת מהן "כמעט מוכלת" בשניה, היינו רוצים לומר שהן "כמעט שוות", ולהתייחס אליהן כאל אותו איבר. ראינו איך ניתן לעשות זאת: עלינו לחלק ביחס שקילות. בתרגיל הבא נעשה זאת באופן כללי. $\diamondsuit$

קדם סדר

תרגיל 2.4.7. נניח ש-$\preceq$ יחס רפלקסיבי וטרנזיטיבי על קבוצה X (יחס כזה נקרא *קדם סדר*). נגדיר יחס $\sim$ על X על-ידי: $x \sim y$ אם $x \preceq y$ וגם $y \preceq x$.

1. הוכיחו ש-$\sim$ יחס שקילות על X.

2. נניח ש-$p : X \to B$ העתקת מנה עבור $\sim$. הוכיחו שקיים יחס יחיד $\leqslant$ על B כך שלכל $x, y \in X$ מתקיים $x \preceq y$ אם ורק אם $p(x) \leqslant p(y)$.

3. הוכיחו $\leqslant$ יחס סדר על B.

4. נניח ש-$q : Y \to C$ פונקציה, ו-R יחס סדר על C. נגדיר $\tilde{R} = \{\langle x, y\rangle \in Y \times Y \mid \langle q(x), q(y)\rangle \in R\}$. הוכיחו ש-$\tilde{R}$ קדם-סדר, אך לא בהכרח סדר.

5. הוכיחו ש-$|$ קדם-סדר על $\mathbb{Z}$, ושפונקציית הערך המוחלט $|\cdot| : \mathbb{Z} \to \mathbb{N}$ היא העתקת מנה עבור יחס השקילות המתאים $\sim$. תארו את יחס הסדר שמתקבל מהבנייה בסעיפים הקודמים.

6. הוכיחו שבדוגמא האחרונה, יחס השקילות שמתקבל מקדם הסדר הוא: $B \sim C$ אם ורק אם $B \triangle C$ סופית.

יחסי סדר הם טבעיים ונפוצים מאוד במתמטיקה, האם יש לנו אפשרות להבין, באיזשהו אופן, מהם כל יחסי הסדר? בשלב ראשון, עלינו להבין איך להשוות בין שני יחסי סדר שונים, ובפרט להבין מתי הם אותו דבר, עד כדי "שינוי שמות". כיוון שקס"ח היא מקרה פרטי של גרף, המושגים *העתקה*, *שיכון* ו*איזומורפיזם* תקפים גם עבורן. בהקשר הזה, העתקה של גרפים נקראת גם *העתקה שומרת סדר*. נשים לב לעובדה שמקילה על הבדיקה שהעתקה היא איזומורפיזם: העתקה שומרת סדר

תרגיל 2.4.8. נניח ש-$f : X \to Y$ שיכון מגרף אנטי-סימטרי $\langle X, R\rangle$ לגרף רפלקסיבי $\langle Y, S\rangle$. אז f חח"ע

בפרט, ההנחות בתרגיל חלות אם R, S יחסי סדר.

דוגמה 2.4.9. הקס"ח $X = \langle \mathcal{P}(\{2,3,5\}), \subseteq\rangle$ איזומורפית לקס"ח $Y = \langle \{1,2,3,5,6,10,15,30\}, |\rangle$. איזומורפיזם $f : X \to Y$ נתון על-ידי $f(A) = \Pi A$, מכפלת האיברים ב-A, עם הופכית $g : Y \to X$ המוגדרת על-ידי: $g(n)$ קבוצת הגורמים הראשוניים של n. (תרגיל) $\diamondsuit$

דוגמה 2.4.10. הקס"ח $X = \langle \mathbb{Z}, \leqslant\rangle$ איזומורפית לקס"ח $Y = \langle \mathbb{Z}, \geqslant\rangle$, איזומורפיזם נתון על-ידי $f(n) = -n$. כיוון ש-$f \circ f = \mathrm{Id}_{\mathbb{Z}}$, זוהי העתקה הפיכה, וההפוכה היא העתקה. $\diamondsuit$

דוגמה 2.4.11. נניח ש-A קבוצה. אז $X = \langle \mathcal{P}(A), \subseteq\rangle$ איזומורפית ל-$\langle \mathcal{P}(A), \supseteq\rangle$: העתקה $f : X \to X$ נתונה על-ידי $f(B) = A \backslash B$, וזה איזומורפיזם, שוב משום ש-$f \circ f = \mathrm{Id}_X$. $\diamondsuit$

האם כל קס"ח איזומורפית לקס"ח ההפוך? נראה ש-$\langle \mathbb{N}, \leqslant\rangle$ אינה איזומורפית ל-$\langle \mathbb{N}, \geqslant\rangle$, אבל איך ניתן להוכיח זאת? ב-$\langle \mathbb{N}, \leqslant\rangle$ *יש מינימום*: איבר $a = 0 \in \mathbb{N}$ כך ש-$a \leqslant b$ לכל $b \in \mathbb{N}$. אם f איזומורפיזם של הקס"ח לקס"ח כלשהו $\langle Y, S\rangle$, אז $f(0)$ יהיה מינימום ב-Y. לכן, אם ב-Y אין מינימום, אז Y לא יכולה להיות איזומורפית ל-$\langle \mathbb{N}, \leqslant\rangle$. בפרט, זה המצב ב-$\langle \mathbb{N}, \geqslant\rangle$: מינימום בקס"ח זו הוא *מקסימום* ב-$\langle \mathbb{N}, \leqslant\rangle$, וזה לא קיים.

את העקרון הזה ניתן להכליל: כיוון שקס"ח איזומורפיות הן "אותו קסח בשינוי שמות האיברים", כל תכונה של יחסי סדר שמוגדרת רק במונחי היחס נשמרת תחת איזומורפיזם, ולכן אם התכונה מופיעה רק באחת הקס"ח, אז הן אינן איזומורפיות.

דוגמה 2.4.12. האם $X = \langle \mathbb{N}, |\rangle$ איזומורפית לקסח ההפוך $Y = \langle \mathbb{N}, |^{-1}\rangle$? בשתיהן יש מינימום ומקסימום, אז הגישה הקודמת לא תעזור. למינימום 1 ב-X יש התכונה הבאה: קיים איבר $b \neq 1$ (ולכן בהכרח גדול ממנו), כך שאין אף איבר שנמצא ממש בין 1 ל-b: למשל $b = 5$ (או באופן כללי, כל ראשוני שונה מ-0). איבר b כזה נקרא *עוקב מיידי* של 1. אם קיים איזומורפיזם f מ-X ל-Y, אז $f(1) = 0$ (כי f שומר על המינימום), ואם $b \in X$ עוקב מיידי של 1, אז $f(b)$ צריך להיות עוקב מיידי של 0 ב-Y, אבל ל-0 אין עוקבים מידיים ב-Y (תרגיל). $\diamondsuit$

ננסח את ההגדרה שהופיעה בדוגמא.

הגדרה 2.4.13. נניח ש-$\langle X, \preceq\rangle$ קס"ח.

1. איבר $a \in X$ נקרא *איבר מינימלי (מזערי)* אם לא קיים $b \neq a$ ב-X כך ש-$b \leq a$. איבר מינימלי (מזערי)

2. אם $a \in X$ איבר כלשהו, *עוקב* של a הוא איבר $b \in X$ המקיים $a \leq b$ ו-$a \neq b$. *עוקב מיידי* של a הוא איבר מינימלי בקבוצת העוקבים של a. עוקב; עוקב מיידי

3. המושגים *איבר מקסימלי (מירבי)*, *קודם* ו*קודם מיידי* מוגדרים כמושגים המקבילים עבור הסדר ההפוך $\leq^{-1}$. איבר מקסימלי (מירבי); קודם; קודם מיידי

תרגיל 2.4.14. הוכיחו ש-b עוקב מיידי של a אם $a \leq b$, $a \neq b$ ולכל $c \in X$, אם $c \leq b$ ו-$a \leq c$ אז $a = c$ או $c = b$.

כאמור, כל תכונה של סדר (או, באופן כללי, של גרפים) נשמרת על-ידי איזומורפיזמים. אין לנו (כרגע) אפשרות לנסח במדויק מה זה "תכונה של סדר", ולכן נסתפק בדוגמאות. הטענה הבאה מנוסחת עבור המושגים שהזכרנו עד כה, אבל נכונה גם ליתר התכונות שמופיעות בהמשך.

טענה 2.4.15. *נניח ש-$\langle X, R\rangle$ ו-ppY, S שני גרפים, ו-$f : X \to Y$ איזומורפיזם.*

1. *X רפלקסיבי, סימטרי, אנטי סימטרי, או טרנזיטיבי אם ורק אם Y כזה. בפרט, X קס"ח אם ורק אם Y קס"ח.*

2. *$a \in X$ מינימום, מקסימום, מינימלי או מקסימלי אם ורק אם $f(a) \in Y$ הוא כזה. בפרט, ב-X יש מינימום אם ורק אם ב-Y הוא ישנו, ובדומה עבור התכונות האחרות.*

3. *$b \in X$ עוקב מיידי של $a \in X$ אם ורק אם $f(b)$ עוקב מיידי של $f(a)$ (ובדומה עבור קודם מיידי).*

הערה 2.4.16. ההגדרות של מינימום, מינימלי וכו' נוסחו עבור קבוצות סדורות, אבל הן תקפות לגרפים כלשהם.

הוכחה. נוכיח עבור עוקבים מידיים. נשתמש בניסוח בתרגיל 2.4.14. נניח ש-$a, b \in X$ ו-b עוקב מיידי של a. עלינו להוכיח ש-$f(a)Sf(b)$, ש-$f(a) \neq f(b)$, ושלכל $d \in Y$, אם $f(a)Sd$ ו-$dSf(b)$, אז $d = f(a)$ או $d = f(b)$. התנאי הראשון נובע ישירות מכך ש-f העתקה, והשני מכך ש-f חח"ע. נסמן ב-g את ההפכית של f, ונשתמש ב-f וב-g על-מנת לתרגם את הבעיה מ-Y ל-X.

נסמן $c = g(d)$. כיוון ש-$f(a)Sd$ ו-g העתקה, $g(f(a))Rg(d) = c$. כיוון ש-g הפוכה ל-f, מתקיים $g(f(a)) = a$. לכן aRc. באופן דומה, $c = g(d)Rg(f(b)) = b$. כיוון ש-b עוקב מיידי של a, נובע מזה ש-$a = c$ או $c = b$. לכן, $f(a) = f(c) = f(g(d))$ או $f(b) = f(c) = f(g(d))$. שוב כיוון ש-f ו-g הפוכות, $d = f(b)$ או $d = f(a)$ כנדרש. $\square$

תרגיל 2.4.17. הוכיחו את הסעיפים האחרים

הערה 2.4.18. במונחים של הסעיף הקודם, אפשר לנסח את הטענה כך: היחס "X איזומורפי ל-Y" הוא יחס שקילות על האוסף $\mathcal{G}$ של כל הגרפים (או על אוסף כל הקס"חים). אם $\pi : \mathcal{G} \to \mathcal{B}$ העתקת מנה עבורו, התכונות מהטענה (כמו קיום מינימום) מוגדרות על $\mathcal{B}$.

סוף הרצאה 4, 15 במאי 2024

אם $\langle X, \preceq\rangle$ קסח, נסמן ב-$\prec$ את היחס $\preceq \setminus \mathrm{Id}_X$.

דוגמה 2.4.19. הקס"חים $\mathbb{Z}$ ו-$\mathbb{Q}$ אינם איזומורפיים: ב-$\mathbb{Z}$ לכל איבר יש עוקב מיידי, וב-$\mathbb{Q}$ לאף איבר אין. $\diamondsuit$

הגדרה 2.4.20. נניח ש-$\langle X, \preceq \rangle$ קס"ח. נאמר ש-X היא *צפופה* אם לכל $x, y \in X$, אם $x \prec y$ אז יש $a \in X$ כך ש-$x \prec a \prec y$. צפופה

דוגמה 2.4.21. $\mathbb{Q}$ צפופה, אבל $\mathbb{Z}$ לא (עם הסדר הרגיל) $\diamondsuit$

תרגיל 2.4.22. קסח X היא צפופה אם ורק אם לאף איבר ב-X אין עוקב מיידי.

הגדרה 2.4.23. שני איברים x, y בקסח $\langle X, \preceq \rangle$ *ניתנים להשוואה* אם מתקיים $x \preceq y$ או $y \preceq x$. ניתנים להשוואה
הקסח X נקרא *קווי* (או *מלא*) אם כל שני איברים ב-X ניתנים להשוואה. קווי מלא

דוגמה 2.4.24. $\langle \mathbb{N}, \leqslant \rangle$ אינה איזומורפית ל-$\langle \mathbb{N}_+, | \rangle$ (כאשר $\mathbb{N}_+$ הטבעיים החיוביים): $\leqslant$ הוא קווי ו-$|$ לא. $\diamondsuit$

עבור סדרים קוויים, הכיוון ההפוך לתרגיל 2.4.8 תקף:

תרגיל 2.4.25. אם $f : X \to Y$ העתקה חח"ע שומרת סדר מסדר קווי X לקס"ח Y, אז f שיכון.

אינטואיטיבית, יחסי סדר קוויים הם "גדולים": הם מחליטים על הכי הרבה זוגות. לכן, טבעי לשאול, האם כל יחס סדר ניתן להרחבה לסדר קווי. הטענה הבאה מאפשרת לנסח את השאלה מחדש.

נניח ש-X קבוצה, ונסמן ב-$\mathcal{O}(X)$ את קבוצת כל יחסי הסדר על X. זוהי תת-קבוצה של $\mathcal{P}(X \times X)$ ולכן סדורה על-ידי הכלה.

טענה 2.4.26. *יחס סדר $\preceq$ על קבוצה X הוא קווי אם ורק אם הוא איבר מירבי ב-$\mathcal{O}(X)$.*

לכן, אפשר להמיר את השאלה "האם $\preceq$ ניתן להרחבה לסדר קווי?" בשאלה "האם יש יחס סדר על X שמרחיב את $\preceq$ והוא מירבי ביחס להכלה?". בהמשך נענה על השאלה הזו.

על-מנת להוכיח את הטענה, נשתמש בתרגיל הבא:

תרגיל 2.4.27. נניח ש-$\preceq$ יחס סדר על X, ונניח ש-$x, y \in X$ לא מקיימים $x \preceq y$. אז קיים יחס סדר $\preceq_1$ על X שמרחיב את $\preceq$, כך ש-$y \preceq_1 x$.

הוכחת הטענה. נניח ש-$\preceq$ קווי, ונניח בשלילה שיש איבר $\preceq'$ ב-$\mathcal{O}(X)$ שמרחיב את $\preceq$. אז יש $x, y \in X$ כך ש-$y \preceq' x$ אבל $\neg x \preceq y$. כיוון ש-$\preceq$ קווי, נובע מזה ש-$y \preceq x$, ולכן גם $y \preceq' x$, בסתירה לאנטי-סימטריות של $\preceq'$.

בכיוון השני, נניח ש-$\preceq$ מירבי ב-$\mathcal{O}(X)$, אבל לא קווי. אז יש $x, y \in X$ שלא ניתנים להשוואה לפי $\preceq$. לפי התרגיל האחרון, קיים $\preceq_1$ שמרחיב את $\preceq$ כך ש-$y \preceq_1 x$. זו סותר את המירביות. $\square$

ראינו מספר דוגמאות מעניינות של תתי-קבוצות סדורות של קבוצות חזקה. נראה עכשיו שניתן לשכן *כל* קבוצה סדורה בקבוצת חזקה. לשם כך, נתבונן על *רישות* של קבוצה סדורה:

הגדרה 2.4.28. אם $\langle X, \preceq \rangle$ קס"ח, *רישא* של X היא תת-קבוצה $A \subseteq X$ המקיימת: אם $a \in A$ ו-$b \in X$ כך ש-$b \preceq a$, אז $b \in A$. רישא

לכל $x \in X$, נסמן $X^{\preceq x} = \{y \in X \mid y \preceq x\}$ ו-$X^{\prec x} = \{y \in X \mid y \prec x\}$. אלה הן רישות של X (תרגיל).

נסמן ב-$\mathcal{I}(X)$ את קבוצת כל הרישות של X. זוהי תת-קבוצה של $\mathcal{P}(X)$, ולכן סדורה על-ידי הכלה.

כמובן ש-$\mathcal{I}(X)$ תלויה גם ביחס הסדר $\preceq$ על X, ולא רק בקבוצה X.

תרגיל 2.4.29. נניח ש-$\langle X, \preceq \rangle$ קס"ח. הוכיחו:

1. חיתוך של שתי רישות של X הוא רישא.
2. הפונקציה $f : X \to \mathcal{I}(X)$ הנתונה על-ידי $f(x) = X^{\preceq x}$ היא שיכון חח"ע, אך אינה על.
3. אם X סדורה קווית, אז גם $\mathcal{I}(X)$ סדורה קווית.

2.4.30 חסמים עליונים

נניח ש-A קבוצה אינסופית. האם $\mathcal{P}(A)$ איזומורפית ל-$\Phi(A)$? התכונות שראינו עד כה לא מאפשרות להבדיל ביניהן.

נזכיר שאם $\mathcal{C}$ היא קבוצה של קבוצות, *האיחוד האונרי* של $\mathcal{C}$ הוא הקבוצה $\bigcup \mathcal{C} = \{x \mid \exists A \in \mathcal{C} x \in A\}$. אם $\mathcal{C}$ תת-קבוצה של $\Phi(A)$ (ולכן בפרט של $\mathcal{P}(A)$), אז $\bigcup \mathcal{C} \in \mathcal{P}(A)$, אבל לא בהכרח ב-$\Phi(A)$. האם אפשר להשתמש באבחנה הזו כדי להבדיל בין שתי הקבוצות הסדורות? לשם כך, עלינו להבין האם אפשר לתאר את $\bigcup \mathcal{C}$ באמצעות הסדר. האיחוד האונרי

נשים לב ש-$\bigcup \mathcal{C}$ מאופיינת באמצעות שתי התכונות הבאות:

1. לכל $A \in \mathcal{C}$ מתקיים $A \subseteq \bigcup \mathcal{C}$
2. אם B קבוצה כלשהי אם התכונה שלכל $A \in \mathcal{C}$ מתקיים $A \subseteq B$, אז $\bigcup \mathcal{C} \subseteq B$.

תרגיל 2.4.31. הוכיחו ש-$\bigcup \mathcal{C}$ אכן מקיימת את שתי התכונות הנ"ל, ושהתכונות הללו מאפיינות אותה, כלומר: אם D קבוצה נוספת שמקיימת את שתי התכונות הנ"ל, אז $\bigcup \mathcal{C} = D$.

כיוון ש-$\subseteq$ הוא יחס הסדר על $\mathcal{P}(A)$, האבחנה הנ"ל מספקת תיאור של $\bigcup \mathcal{C}$ במונחים של יחס הסדר. תיאור זה ניתן להכליל:

הגדרה 2.4.32. נניח ש-$\langle X, \preceq \rangle$ קס"ח, ו-$\mathcal{C} \subseteq X$. *חסם מלעיל* של $\mathcal{C}$ הוא איבר $b \in X$ המקיים $a \preceq b$ לכל $a \in \mathcal{C}$. *חסם עליון* של $\mathcal{C}$ הוא המינימום של קבוצת כל החסמים מלעיל של $\mathcal{C}$ (אם הוא קיים). המושגים המקבילים עבור הסדר ההפוך נקראים *חסם מלרע* ו*חסם תחתון*. חסם מלעיל חסם עליון חסם מלרע חסם תחתון

כלומר, חסם עליון של $\mathcal{C}$ הוא איבר $b \in X$ המקיים: $a \preceq b$ לכל $a \in \mathcal{C}$ ו-$b \preceq c$ לכל חסם מלעיל c של $\mathcal{C}$. נדגיש ש-b לא חייב להיות איבר של $\mathcal{C}$. כיוון שמינימום של קבוצה הוא יחיד, לכל תת-קבוצה יש לכל היותר חסם עליון אחד.

תרגיל 2.4.33. אם ל-$\mathcal{C}$ יש חסם עליון ששייך ל-$\mathcal{C}$ אז הוא המקסימום של $\mathcal{C}$. אם ל-$\mathcal{C}$ יש מקסימום, אז הוא גם החסם העליון של $\mathcal{C}$.

דוגמה 2.4.34. 1 הוא החסם העליון של הקטע הפתוח $\mathcal{C}=\{x\in\mathbb{Q}\mid 0<x<1\}$ ב-$\mathbb{Q}$. $\diamondsuit$

דוגמה 2.4.35. לכל קבוצה A, ולכל $\mathcal{C}\subseteq\mathcal{P}(A)$, הקבוצה $\bigcup\mathcal{C}$ היא החסם העליון של $\mathcal{C}$. $\diamondsuit$

דוגמה 2.4.36. נסמן $\mathcal{C}=\{\{2n\}\mid n\in\mathbb{N}\}\subseteq\Phi(\mathbb{N})$ (קבוצת היחידונים של מספרים זוגיים). האיחוד $\bigcup\mathcal{C}$ הוא החסם העליון של $\mathcal{C}$ כתת-קבוצה של $\mathcal{P}(\mathbb{N})$, אך אינו שייך ל-$\Phi(\mathbb{N})$. זה לא אומר שאין לא חסם עליון שם: אולי יש איבר אחר שהוא החסם העליון שלו שם.

נניח בשלילה שיש ל-$\mathcal{C}$ חסם עליון B ב-$\Phi(\mathbb{N})$. אז B קבוצה סופית, או שהמשלימה שלה סופית. המקרה הראשון אינו אפשרי, משום ש-B כוללת כל מספר זוגי. במקרה השני, ב-B יש לפחות מספר אי-זוגי אחד k (כל מספר אי-זוגי שאינו במשלימה ש-B). אבל אז גם $B\setminus\{k\}$ כוללת את כל הזוגיים, בסתירה למינימליות של B.

מצאנו תת-קבוצה של $\Phi(\mathbb{N})$ שאין לה חסם עליון, ולכן $\Phi(\mathbb{N})$ אינה איזומורפית ל-$\mathcal{P}(\mathbb{N})$. $\diamondsuit$

תרגיל 2.4.37. הוכיחו שהתכונה "לכל תת-קבוצה יש חסם עליון" של קבוצות סדורות נשמרת תחת איזומורפיזם.

לתכונה שלכל תת-קבוצה יש חסם עליון יש השלכות מעניינות. נניח ש-$f:X\to X$ פונקציה מקבוצה X לעצמה. במצב הזה טבעי ומעניין לשאול האם יש איבר $x\in X$ כך ש-$f(x)=x$. איבר כזה נקרא *נקודת שבת* של f. בהקשר שלנו, ישנה הטענה הכללית הבאה: נקודת שבת

טענה 2.4.38. *נניח ש-$\langle X,\preceq\rangle$ קס"ח בה לכל תת-קבוצה יש חסם עליון, ונניח ש-$f:X\to X$ שומרת סדר. אז ל-f יש נקודת שבת.*

הוכחה. נסמן $\mathcal{C}=\{x\in X\mid x\preceq f(x)\}$. לפי ההנחה, ל-$\mathcal{C}$ יש חסם עליון a. נוכיח ש-a נקודת שבת של f.

נניח ש-$x\in\mathcal{C}$. אז $x\preceq a$ משום ש-a חסם (מלעיל) של $\mathcal{C}$. כיוון ש-f שומרת סדר, $f(x)\preceq f(a)$, וכיוון ש-$x\in\mathcal{C}$, מקבלים $x\preceq f(x)\preceq f(a)$. הוכחנו ש-$f(a)$ חסם מלעיל של $\mathcal{C}$, ולכן החסם העליון a קודם לו, $a\preceq f(a)$.

בפרט, $a\in\mathcal{C}$. כעת, נשים לב שלכל $x\in\mathcal{C}$ גם $f(x)\in\mathcal{C}$: כיוון ש-$x\preceq f(x)$, הפעלת f נותנת $f(x)\preceq f(f(x))$. בפרט, $f(a)\in\mathcal{C}$. כיוון ש-a חסם מלעיל של $\mathcal{C}$ ו-$f(a)\in\mathcal{C}$, מקבלים $f(a)\preceq a$. בסה"כ, הוכחנו אי-שוויון לשני הכיוונים, אז $f(a)=a$. $\square$

ראינו מספר תכונות שמאפשרות לנו להוכיח שקבוצות סדורות לא איזומורפיות. אם אנחנו רוצים להוכיח ששתי קבוצות סדורות הן כן איזומורפיות, האופן היחיד שיש לנו כרגע הוא למצוא איזומורפיזם ספציפי, וזה לעתים קשה. היה יותר נוח אם היינו יכולים לאפיין קבוצות סדורות באמצעות התכונות שלהן. למשל, נניח שנתונה קס"ח $\langle X,\preceq\rangle$ כך ש-$\preceq$ סדר קווי, X צפופה וללא מינימום או מקסימום. דוגמא אחת לקבוצה כזו היא $\mathbb{Q}$, עם הסדר הרגיל, אבל עוד דוגמא היא תת-הקבוצה של $\mathbb{Q}$ המורכבת ממספרים קטנים מ-1 וגדולים מ-0. האם קבוצה כזו בהכרח איזומורפית ל-$\langle\mathbb{Q},\leqslant\rangle$? על מנת שזה יקרה, הכרחי כמובן שקיימת בכלל פונקציה הפיכה מ-X ל-$\mathbb{Q}$ (ללא שום תנאים על הסדר). תחת ההנחה הזו, אנחנו נראה בהמשך שהתשובה היא "כן". סוף הרצאה 5, 20 במאי 2024

3 המספרים הטבעיים

3.1 הגדרות וכלים

המטרה שלנו היא לתאר, עד כדי איזומורפיזם, את קבוצת המספרים הטבעיים כקבוצה סדורה. למעשה, נשיג יותר: נראה שהאיזומורפיזם יחיד. התיאור כלול בהגדרה הבאה:

מודל של הטבעיים

הגדרה 3.1.1. *מודל של הטבעיים* הוא קס"ח $\langle M, \preceq \rangle$ המקיימת:

1. ב-M אין מקסימום
2. לכל איבר שאינו מינימום יש קודם מיידי
3. *עקרון המינימום:* בכל תת-קבוצה לא ריקה של M יש מינימום

עקרון המינימום

למעשה, ההנחה ש-$\preceq$ יחס סדר מיותרת:

תרגיל 3.1.2. נניח ש-R יחס על קבוצה X כך שלכל תת-קבוצה לא ריקה $A \subseteq X$ קיים $a \in A$ יחיד עבורו aRb לכל $b \in A$. הוכיחו ש-R סדר קווי על X, שמקיים את עקרון המינימום.

תרגיל 3.1.3. הוכיחו שיחס סדר $\preceq$ על X מקיים את עקרון המינימום אם ורק אם אין שיכון מקבוצה סדורה קווית שאין בה מינימום ל-X.

עד סיום הסעיף, נקבע מודל $\langle M, \preceq \rangle$ של הטבעיים.

טענה 3.1.4. *לכל איבר $m \in M$ יש עוקב יחיד*

הוכחה. עבור $m \in M$, נתבונן ב-$A = \{n \in M \mid m \prec n\}$. כיוון ש-$m$ אינו מקסימלי, A אינה ריקה, ולכן לפי עקרון המינימום יש לה מינימום a. לפי הגדרת העוקב המיידי, a עוקב מיידי של m. יחידות העוקב (אם הוא קיים) תקפה בכל סדר קווי (תרגיל). □

לפי עקרון המינימום, ב-M עצמה יש מינימום, אותו נסמן ב-0, ולפי הטענה האחרונה ישנה פונקציית עוקב $s : M \to M$ (שמתאימה לכל איבר את העוקב שלו). אם מדובר על יותר ממודל אחד של הטבעיים, נסמן 0_M ו-s_M במקום 0 ו-s.

איך ניתן להוכיח טענות על מודלים של הטבעיים? הכלי העיקרי הוא *אינדוקציה*.

אינדוקציה

משפט 3.1.5 (אינדוקציה רגילה). *נניח ש-$P \subseteq M$ מקיימת: $0 \in P$ ולכל $n \in P$ גם $s(n) \in P$. אז $P = M$.*

בהקשר הזה, נוח לחשוב שמנסים להוכיח שתכונה כלשהי תקפה עבור כל איברי M, ואז P היא קבוצת האיברים עבורם התכונה נכונה. המשפט אומר שמספיק להוכיח שהתכונה תקפה עבור 0 (בסיס האינדוקציה) ושלכל $m \in M$, אם היא תקפה עבור m אז היא תקפה עבור $s(m)$ (צעד האינדוקציה).

הוכחה. נסמן $A = M \backslash P$. אם $P \neq M$, אז A לא ריקה, ולכן יש לה מינימום a. לא יתכן ש-$a = 0$ כי $0 \in P$. לכן, ל-a יש קודם מיידי $b \in M$. כיוון ש-$b \prec a$ ו-a המינימום של A, לא יתכן ש-$b \in A$, ולכן $b \in P$. לכן, לפי ההנחה, גם $s(b) \in P$. אבל $s(b) = a \in A$, וקיבלנו סתירה. □

למעשה, האפשרות להוכיח טענות באינדוקציה *מאפיינת* מודלים של הטבעיים, במובן הבא:

תרגיל 3.1.6. נניח ש-$\langle X, \trianglelefteq \rangle$ קבוצה סדורה בסדר קווי, עם מינימום x_0, ונניח שלכל איבר x ב-X יש עוקב מיידי $t(x)$. נניח שעקרון האינדוקציה מתקיים ב-X: לכל תת-קבוצה $P \subseteq X$, אם $x_0 \in P$ ולכל $x \in P$ גם $t(x) \in P$, אז $P = X$. הוכיחו ש-$\langle X, \trianglelefteq \rangle$ מודל של הטבעיים.

עקרון מועיל נוסף הוא אינדוקציה שלמה. הסימונים במשפט הם מהגדרה 2.4.28.

משפט 3.1.7 (אינדוקציה שלמה). *נניח ש-$\langle X, \trianglelefteq \rangle$ קס"ח. אז שני התנאים הבאים שקולים:*

1. *עקרון המינימום: בכל תת-קבוצה לא ריקה של X יש מינימום*
2. *אינדוקציה שלמה: $\trianglelefteq$ קווי, ולכל $P \subseteq X$, אם לכל $a \in X$ עבורה $X^{\triangleleft a} \subseteq P$ גם $a \in P$, אז $P = X$.*

הוכחה. נניח את עקרון המינימום, ונניח ש-P מקיימת את ההנחה של אינדוקציה שלמה. אם $P \neq M$, אז $A = M \backslash P$ לא ריקה, ולכן יש בה מינימום a. אז $M^{\triangleleft a} \subseteq P$. לפי ההנחה $a \in P$, בסתירה להנחה ש-a המינימום של A.

נניח עכשיו שהסדר קווי ואת עקרון האינדוקציה השלמה, ונניח שב-$A \subseteq X$ אין מינימום. נגדיר $P = X \backslash A$. אם $a \in X$ מקיים $M^{\triangleleft a} \subseteq P$, אז $a \notin A$, כי אחרת a מינימלי ב-A וכיוון שהסדר קווי, הוא גם מינימום שם. לפי אינדוקציה שלמה, $P = M$ ולכן A ריקה. □

דוגמה 3.1.8. נוכיח שכל מספר טבעי חיובי הוא מכפלה של ראשוניים. נסמן ב-P את קבוצת הטבעיים שהם 0 או מכפלה של ראשוניים. נניח ש-n טבעי, ונניח שלכל $k < n$, הטענה נכונה (כלומר $k \in P$). אם n ראשוני (או 0) הטענה ברורה. אחרת, $n = k \cdot l$ עבור $k, l < n$. לפי ההנחה, $k, l \in P$ ולכן כל אחד מהם מכפלה של ראשוניים ולכן גם n. ♢

3.2 הגדרה ברקורסיה

ראינו איך להוכיח טענות על מודלים של הטבעיים, אבל המטרה שלנו היא *לבנות* העתקה. המשפט הבא מספק כלי כללי לבניית העתקות ממודל של הטבעיים. הרעיון הוא שאם $t : A \to A$ פונקציה כלשהי, ו-$a \in A$, יש פונקציה מ-M ל-A ששולחת את $m \in M$ ל-"t מופעלת m פעמים על a".

משפט 3.2.1 (הגדרה ברקורסיה). *נניח ש-$t : A \to A$ פונקציה כלשהי, ו-$a \in A$. אז קיימת פונקציה יחידה $f : M \to A$ עם התכונות:*

1. *$f(0) = a$*
2. *לכל $m \in M$ מתקיים $f(s(m)) = t(f(m))$.*

סדרה
נוסחת נסיגה

פונקציה מהטבעיים (או ממודל של הטבעיים) ל-A נקראת גם *סדרה* (עם ערכים ב-A). תיאור הסדרה במונחים של המשפט נקרא גם *נוסחת נסיגה*.

דוגמה 3.2.2. נניח ש-$t : \mathbb{R} \to \mathbb{R}$ נתונה על-ידי $t(x) = \pi x$. מהמשפט נובע שקיימת פונקציה יחידה $f : \mathbb{N} \to \mathbb{R}$ כך ש-$f(0) = 1$ ולכל $n \in \mathbb{N}$ מתקיים $f(n+1) = \pi \cdot f(n)$. זוהי פונקציית החזקה, $f(n) = \pi^n$. ♢

נוכיח את המשפט בהמשך. בשלב זה, נראה שהמשפט נותן לנו את התוצאה על יחידות הטבעיים. לשם כך, נניח שנתון מודל נוסף של הטבעיים, $\langle N, \trianglelefteq\rangle$, עם מינימום $*$ ופונקציית עוקב $t : N \to N$.

מסקנה 3.2.3. *קיימת פונקציה יחידה $f : M \to N$ כך ש-$f(0) = *$ ו-$f(s(m)) = t(f(m))$ לכל $m \in M$.*

הוכחה. נשתמש במשפט ההגדרה ברקורסיה עבור $A = N$, $a = *$ ו-t. □

קיבלנו פונקציה, אבל לא ברור שהיא הפיכה. לשם כך, נשים לב:

מסקנה 3.2.4. *אם $h : M \to M$ מקיימת $h(0) = 0$ ו-$h(s(m)) = s(h(m))$ לכל $m \in M$, אז h פונקציית הזהות על M.*

הוכחה. נשתמש במשפט עבור $A = M$, $a = 0$ ו-$t = s$. מהיחידות במשפט נקבל שיש רק פונקציה אחת h עם התכונות הרצויות. כיוון שהזהות מספקת את הדרישות הללו, h היא בהכרח הזהות. □

מסקנה 3.2.5. *הפונקציה ממסקנה 3.2.3 היא הפיכה*

הוכחה. לפי מסקנה 3.2.3 עבור המודל N, קיימת פונקציה $g : N \to M$ המקיימת $g(*) = 0$ ו-$g(t(n)) = s(g(n))$ לכל $n \in N$. ההרכבה $h = g \circ f$ מקיימת $h(0) = g(f(0)) = g(*) = 0$ ולכל $m \in M$,

$$h(s(m)) = g(f(s(m))) = g(t(f(m))) = s(g(f(m))) = s(h(m))$$

לפי מסקנה 3.2.4, h היא הזהות, ובאופן דומה עבור ההרכבה $f \circ g$. □

על-מנת להוכיח ש-M ו-N איזומורפיים, נותר להראות שהפונקציות f ו-g שהוגדרו הן שומרות סדר. נראה זאת באופן יותר כללי.

טענה 3.2.6. *נניח ש-$\langle M, \preceq\rangle$ מודל של הטבעיים, ו-$\langle X, \trianglelefteq\rangle$ קבוצה סדורה כלשהי. נניח ש-$f : M \to X$ פונקציה המקיימת $f(m) \lhd f(s(m))$ לכל $m \in M$. אז f היא פונקציה עולה: $f(n) \lhd f(m)$ לכל $n \prec m$.*

הוכחה. נוכיח באינדוקציה על m שלכל $n \in M$, אם $n \prec m$ אז $f(n) \lhd f(m)$. עבור $m = 0$ הטענה נכונה באופן ריק.

נניח שהטענה נכונה עבור m, ונניח ש-$n \prec s(m)$. אז $n \preceq m$ ולכן לפי הנחת האינדוקציה $f(n) \trianglelefteq f(m)$. מאידך, לפי ההנחה $f(m) \prec f(s(m))$, אז סיימנו. □

מסקנה 3.2.7. *לכל שני מודלים $\langle M, \preceq\rangle$ ו-$\langle N, \trianglelefteq\rangle$ קיים איזומורפיזם סדר יחיד $f : M \to N$*

הוכחה. לפי מסקנה 3.2.5 קיימת פונקציה הפיכה $f : M \to N$ ששומרת על 0 ועל העוקב (כמו במסקנה 3.2.3), וההפוכה גם מקיימת שומרת על 0 ועל העוקב. לפי טענה 3.2.6, אלה הן העתקות שומרות סדר.

היחידות נובעת מכך שכל איזומורפיזם לוקח את המינימום למינימום ועוקבים לעוקבים, ולכן היא נובעת מהיחידות במסקנה 3.2.3. □

המסקנה האחרונה מראה שיש *לכל היותר* מודל אחד של הטבעיים. לא ברור כרגע שמודל כזה אכן קיים. נדון על כך בהמשך, אבל בשלב זה נניח שמודל כזה אכן קיים, וכיוון שהוא יחיד מכל בחינה מעשית, אפשר לסמן אותו, כרגיל ב-$\mathbb{N}$. באופן דומה, נכתוב $n+1$ במקום $s(n)$ (למרות שעדיין לא הגדרנו חיבור, גם את זה נעשה בהמשך).

3.2.8 עוד גרסאות של הגדרה ברקורסיה

ישנן גרסאות טבעיות נוספות של הגדרה ברקורסיה, שלא מכוסות ישירות על-ידי המשפט המקורי, אבל את כולן ניתן לקבל כמסקנה.

פונקציית העצרת

דוגמה 3.2.9. *פונקציית העצרת* היא הפונקציה שמתאימה למספר טבעי n את מספר התמורות של הקבוצה $\{1,\dots,n\}$ (כלומר, פונקציות הפיכות מהקבוצה אל עצמה). מספר זה מסומן על-ידי $n!$. לא קשה לראות ש-$0!=1$ ושלכל n טבעי, $(n+1)!=(n+1)\cdot n!$. היינו רוצים להסיק ממשפט ההגדרה ברקורסיה שהתנאים הללו *מגדירים* פונקציית העצרת, אבל הניסוח של המשפט לא מאפשר לעשות זאת בנוחות, משום שהפונקציה t במשפט תלוי רק ב-$f(n)$ ולא ב-n. $\diamondsuit$

מסקנה 3.2.10. *נניח ש-A קבוצה, $a\in A$ ו-$t:\mathbb{N}\times A\to A$ פונקציה כלשהי. אז קיימת פונקציה יחידה $f:\mathbb{N}\to A$ עם התכונות:*

1. $f(0)=a$
2. $f(n+1)=t(n,f(n))$

תרגיל 3.2.11. הסיקו את מסקנה 3.2.10 מתוך משפט 3.2.1. הסבירו איך המסקנה מאפשרת להגדיר את פונקציית העצרת.

סוף הרצאה 6, 22 במאי 2024

סדרת פיבונצ'י

סדרה מפורסמת נוספת שמוגדרת על-ידי נוסחת נסיגה היא *סדרת פיבונצ'י*. זוהי פונקציה $\phi:\mathbb{N}\to\mathbb{N}$ בעלת התכונות $\phi(0)=\phi(1)=1$ ו-$\phi(n+2)=\phi(n+1)+\phi(n)$ לכל $n\in\mathbb{N}$. משפט 3.2.1 לא מבטיח שזו הגדרה תקינה של פונקציה, משום שהנוסחה תלויה בשני ערכים קודמים ולא אחד.

תרגיל 3.2.12. נניח ש-A קבוצה, $k\geqslant 1$ טבעי, $a_0,\dots,a_{k-1}\in A$ ו-$t:A^k\to A$ פונקציה. הוכיחו שקיימת פונקציה יחידה $f:\mathbb{N}\to A$ כך ש-$f(i)=a_i$ לכל $i<k$, ו-$f(n+k)=t(f(n),\dots,f(n+k-1))$ לכל n. הסבירו איך הטענה מאפשרת להגדיר את סדרת פיבונצ'י

בגרסא הכי כללית שנראה, נוסחת הנסיגה יכולה להיות תלויה בכל הערכים הקודמים, וגם ב-n. למשל, קיימת פונקציה יחידה $f:\mathbb{N}\to\mathbb{R}$ כך ש-$f(n)=\sum_{k=0}^{n-1}kf(k)+\pi$.

סדרה סופית

האורך של הסדרה

על מנת לנסח אותה, נגדיר מספר מושגים. בהנתן קבוצה A, *סדרה סופית* של איברי A היא פונקציה $\alpha:\mathbb{N}^{<k}\to A$ (עבור $k\in\mathbb{N}$ כלשהו). k נקרא *האורך של הסדרה*, ומסומן ב-$|\alpha|$. נסמן ב-A^* את קבוצת כל הסדרות הסופיות של איברי A.

מסקנה 3.2.13. *נניח ש-A קבוצה, ו-$t:A^*\to A$ פונקציה. אז קיימת פונקציה יחידה $f:\mathbb{N}\to A$ כך שלכל $n\in\mathbb{N}$ מתקיים $f(n)=t(f\restriction_{\mathbb{N}^{<n}})$.*

תרגיל 3.2.14. הוכיחו את מסקנה 3.2.13 והסבירו איך כל הדוגמאות הקודמות מתקבלות ממנה

3.3 הוכחת משפט ההגדרה ברקורסיה

לצורך הוכחת המשפט, נקבע שוב מודל $\langle M, \leq \rangle$ של הטבעיים. נקבע פונקציה $t : A \to A$ ואיבר $a \in A$ כמו במשפט. על מנת להוכיח את המשפט, נתבונן בפתרונות לבעיה יותר כללית: נאמר שפונקציה $f : D \to A$ היא *פתרון חלקי* של הבעיה אם D רישא לא ריקה של M, והדרישות במשפט מתקיימות עבור איברי D, כלומר: $f(0) = a$, ולכל $n \in D$, אם $s(n) \in D$ אז $f(s(n)) = t(f(n))$ (כיוון ש-D רישא, אם $s(n) \in D$ אז גם $n \in D$). נשים לב ראשית:

תרגיל 3.3.1. נניח ש-$f : D \to M$ פתרון חלקי, ו-$D_1 \subseteq D$ רישא. אז $f \restriction_{D_1}$ גם פתרון חלקי.

נוכיח כעת גרסא חזקה יותר של היחידות: כיוון ש-M עצמו הוא רישא, היחידות נובעת מהטענה הבאה.

טענה 3.3.2. *אם $f : D \to M$ ו-$g : D \to M$ שני פתרונות חלקיים עם אותו תחום, אז $f = g$.*

הוכחה. נוכיח, באינדוקציה על m, שאם $m \in D$ אז $f(m) = g(m)$. עבור $m = 0$ מתקיים לפי ההנחה $f(0) = a = g(0)$. נניח שהטענה נכונה עבור m, ונניח ש-$s(m) \in D$ (אחרת הטענה נכונה באופן ריק). אז לפי ההגדרה של פתרון חלקי, בשילוב עם הנחת האינדוקציה, $f(s(m)) = t(f(m)) = t(g(m)) = g(s(m))$. □

פתרונות חלקיים יותר קל לייצר מפתרון מלא. למשל, הפונקציה $\{\langle 0, a \rangle\}$ היא פתרון חלקי על התחום $\{0\}$. באופן יותר כללי:

טענה 3.3.3. *לכל $m \in M$, קיים פתרון חלקי $f_m : M^{\leq m} \to A$*

הוכחה. באינדוקציה על m. עבור $m = 0$ הפונקציה $f_0 = \{\langle 0, a \rangle\}$ היא פתרון חלקי. נניח שקיים פתרון חלקי f_m, ונגדיר $f_{s(m)} = f_m \cup \{\langle s(m), t(f_m(m)) \rangle\}$. אז $f_{s(m)}$ פונקציה שתחומה הוא $M^{\leq s(m)}$ ועלינו להוכיח שזהו פתרון חלקי. כיוון ש-$0 \in M^{\leq m}$, מתקיים $f_{s(m)}(0) = f_m(0) = a$. באופן דומה, אם $n < m$ אז $s(n) \in M^{\leq m}$ ולכן $f_{s(m)}(s(n)) = f_m(s(n)) = t(f_m(n))$ לפי הנחת האינדוקציה. מאידך, אם $n = m$ אז התנאי מתקיים ישירות מבניית $f_{s(m)}$. □

לסיכום, יש לנו פתרונות חלקיים ש"הולכים ומתקרבים" לפתרון שאנחנו מחפשים, ואנחנו מעוניינים "להדביק" אותם לפתרון שלם. הטענה הבאה נותנת קריטריון כללי שמאפשר את ההדבקה.

טענה 3.3.4. *נניח ש-$\mathcal{C}$ קבוצה של פונקציות, ולכל $f \in \mathcal{C}$ נסמן ב-D_f את התחום של f. אז התנאים הבאים שקולים:*

1. *קיימת פונקציה h שתחומה $\bigcup\{D_f \mid f \in \mathcal{C}\}$, ומקיימת $h \restriction_{D_f} = f$ לכל $f \in \mathcal{C}$.*
2. *לכל $f, g \in \mathcal{C}$ מתקיים $f \restriction_{D_f \cap D_g} = g \restriction_{D_f \cap D_g}$.*

אם התנאים מתקיימים, אז h כזו היא יחידה.

תרגיל 3.3.5. הוכיחו את טענה 3.3.4

כעת אפשר לסיים את הוכחת משפט ההגדרה ברקורסיה:

הוכחת משפט 3.2.1. היחידות היא מקרה פרטי של טענה 3.3.2. על מנת להוכיח קיום, נתבונן בקבוצה $\mathcal{C}$ של פתרונות חלקיים לבעיה. אם $f, g \in \mathcal{C}$, אז התחומים D_f ו-D_g שלהן הם רישות של M. לפי תרגיל 2.4.29, הקבוצה $D = D_f \cap D_g$ אף היא רישא, ולכן לפי תרגיל 3.3.1, $f\restriction_D$ ו-$g\restriction_D$ פתרונות חלקיים. לכן, לפי טענה 3.3.2, $f\restriction_D = g\restriction_D$.

הוכחנו שכל שני איברים של $\mathcal{C}$ מסכימים על התחום המשותף. לכן, לפי טענה 3.3.4, קיימת פונקציה $h : D \to A$, כאשר $D = \bigcup\{D_f \mid f \in \mathcal{C}\}$, שהצמצום שלה לתחום D_f הוא f, לכל $f \in \mathcal{C}$. לפי טענה 3.3.3, $\mathcal{C}$ כוללת פונקציות שתחומן הוא $M^{\le m}$, לכל $m \in M$. לכן, $D = M$.

נותר להוכיח ש-$h(0) = a$ וש-$h(s(m)) = t(h(m))$ לכל $m \in M$. בהינתן $m \in M$, מתקיים

$$h(s(m)) = f_{s(m)}(s(m)) = t(f_{s(m)}(m)) = t(h(m))$$

משום ש-$m, s(m) \in M^{\le s(m)}$. באופן דומה, $h(0) = f_0(0) = a$. □

סוף הרצאה 7, 27 במאי 2024

3.4 פעולות החשבון

ראינו שכל שני מודלים של הטבעיים הם איזומורפיים באופן יחיד כקבוצות סדורות, אבל על הטבעיים מוגדרות גם פעולות: חיבור, כפל, חזקה וכו'. האם יתכן שבשני מודלים של הטבעיים הפעולות הללו יהיו מוגדרות באופן שונה (מהותית)? ליתר דיוק, נניח ש-M_1 ו-M_2 שני מודלים של הטבעיים, כאשר על כל אחד ישנה פעולת חיבור $+_1$ ו-$+_2$. הוכחנו שקיים איזומורפיזם יחיד $f : M_1 \to M_2$ של קבוצות סדורות. האם בהכרח, לכל $m, n \in M_1$ מתקיים $f(m +_1 n) = f(m) +_2 f(n)$?

בסעיף זה נראה שהתשובה היא כן: כל פעולות החשבון נקבעות על-ידי הסדר. למעשה, נשתמש במשפט ההגדרה ברקורסיה. ראשית, נשים לב שאנחנו יודעים להגדיר את הפונקציה a_n של "הוספת n".

הגדרה 3.4.1. נניח ש-$n \in \mathbb{N}$. נגדיר את הפונקציה $a_n : \mathbb{N} \to \mathbb{N}$ ברקורסיה על-ידי התנאים $a_n(0) = n$ ו-$a_n(s(m)) = s(a_n(m))$ לכל $m \in \mathbb{N}$.

למשל, a_0 היא הזהות, ו-$a_1 = a_{s(0)} = s$.

תרגיל 3.4.2. הוכיחו שלכל $n, m \in \mathbb{N}$:

1. $a_{s(n)} = s \circ a_n = a_n \circ s$
2. $a_n(m) = a_m(n)$
3. $a_n \circ a_m = a_m \circ a_n$

אנחנו רוצים להגדיר $n + m = a_n(m)$. ישנו קושי טכני: לא ברור שישנה פונקציה שמתאימה ל-n את a_n. זו בעיה שלא קשה לפתור:

טענה 3.4.3. *קיימת פונקציה* $a : \mathbb{N} \to \mathbb{N}^{\mathbb{N}}$ *כך ש-*$a(n) = a_n$.

הוכחה. נשתמש במשפט ההגדרה ברקורסיה עבור הנתונים $A=\mathbb{N}^{\mathbb{N}}$, התנאי ההתחלתי $a_0=\mathrm{Id}_{\mathbb{N}}$ ו-$t:A\to A$ נתונה על-ידי $t(f)=s\circ f$. אז המשפט מספק פונקציה (יחידה) $a:\mathbb{N}\to A$ כך ש-$a(0)=a_0$ ו-$a(s(n))=s\circ a(n)$. אז הטענה נובעת מאינדוקציה ותרגיל 3.4.2. □

החיבור על הטבעיים

הגדרה 3.4.4. *החיבור על הטבעיים* מוגדר על-ידי $m+n=a(m)(n)$, עבור כל $m,n\in\mathbb{N}$, כאשר a הפונקציה מטענה 3.4.3

מתרגיל 3.4.2 נובע שהחיבור הוא, כצפוי, חילופי: $m+n=n+m$. תכונות נוספות של החיבור ניתן לבדוק בדרך דומה.

ההגדרה של כפל, חזקה וכו', נעשות באופן דומה:

הכפל על הטבעיים

הגדרה 3.4.5. נגדיר פונקציה $m:\mathbb{N}\to\mathbb{N}^{\mathbb{N}}$ ברקורסיה על-ידי: $m(0)=0$ (הפונקציה הקבועה 0), ו-$m(s(k))=m(k)+\mathrm{Id}_{\mathbb{N}}$ לכל $k\in\mathbb{N}$. *הכפל על הטבעיים* מוגדר על-ידי $n\cdot k=m(n)(k)$ לכל n,k.

פעולת החזקה על הטבעיים

באופן דומה, הפונקציה $p:\mathbb{N}\to\mathbb{N}^{\mathbb{N}}$ מוגדרת ברקורסיה על-ידי $p(0)=1$ (הפונקציה הקבועה 1), ו-$p(s(k))=p(k)\cdot\mathrm{Id}_{\mathbb{N}}$. *פעולת החזקה על הטבעיים* מוגדרת על-ידי $n^k=p(k)(n)$.

תרגיל 3.4.6. הוכיחו שהכפל חילופי: $n\cdot m=m\cdot n$ לכל $n,m\in\mathbb{N}$.

3.5 תתי-קבוצות של הטבעיים

סופית

הגדרה 3.5.1. לקבוצה X *יש גודל* $n\in\mathbb{N}$ אם יש פונקציה הפיכה $f:X\to\mathbb{N}^{<n}$. קבוצה X היא *סופית* אם יש $n\in\mathbb{N}$ כך של-X יש גודל n.

נשים לב שאם יש פונקציה הפיכה $f:X\to Y$ אז ל-X יש גודל n אם ורק אם ל-Y יש גודל n.

טענה 3.5.2 (עקרון שובך יונים). *אם ל-X יש גודל n ול-Y יש גודל m כאשר $n>m$, אז אין פונקציה חח"ע מ-X ל-Y.*

אם A קבוצה כלשהי, ו-$a,b\in A$, נסמן ב-$t_{a,b}=\mathrm{Id}_A\setminus\{\langle a,a\rangle,\langle b,b\rangle\}\cup\{\langle a,b\rangle,\langle b,a\rangle\}$ זוהי פונקציה הפיכה, הפונקציה היחידה שמחליפה בין a ל-b ומשאירה את יתר האיברים במקומם.

הוכחה. מספיק להוכיח שעבור $n>m$, אין פונקציה חח"ע מ-$\mathbb{N}^{<n}$ ל-$\mathbb{N}^{<m}$, באינדוקציה על n. עבור $n=0$ הטענה נכונה באופן ריק. נניח ש-$f:\mathbb{N}^{<s(n)}\to\mathbb{N}^m$ חח"ע. בפרט, $m>0$, אז יש לו קודם מיידי $m-1$. אז $g=t_{f(n),m-1}\circ f$ גם היא פונקציה כזו, ו-$g(n)=m-1$. כיוון ש-g חח"ע, התמונה של $h=g\restriction_{\mathbb{N}^{<n}}$ מוכלת ב-$\mathbb{N}^{m-1}$, ו-h חח"ע, בסתירה להנחת האינדוקציה. □

מסקנה 3.5.3. *אם ל-X יש גודל n וגם גודל m אז $n=m$.*

הגודל של X

אם ל-X יש גודל n, נסמן $|X|=n$, ונאמר ש-n הוא *הגודל של X*.

מסקנה 3.5.4. *הקבוצה $\mathbb{N}$ אינה סופית*

תרגיל 3.5.5. הוכיחו את המסקנות

תרגיל 3.5.6. נניח ש-$\langle X, \preceq \rangle$ קבוצה סדורה סופית.

1. הוכיחו שב-X יש איברי מזערי.
2. הוכיחו שאם $a \in X$ מזערי *יחיד*, אז הוא מינימום.
3. הראו ששני הסעיפים הקודמים לא בהכרח נכונים אם X אינה סופית.
4. הוכיחו שניתן להרחיב את $\preceq$ לסדר קווי על X.
5. הוכיחו שאם הסדר $\preceq$ הוא קווי אז קיים $n \in \mathbb{N}$ כך ש-X איזומורפית ל-$\mathbb{N}^{<n}$.

טענה 3.5.7. *נניח ש-*$X \subseteq \mathbb{N}$.

1. *אם X לא ריקה וחסומה אז יש לה מקסימום.*
2. *אם X אינה חסומה, אז היא איזומורפית (עם הסדר המושרה) ל-$\mathbb{N}$.*
3. *X סופית אם ורק אם היא חסומה (מלעיל).*

הוכחה. 1. לפי ההנחה, הקבוצה $A = \{n \mid X \subseteq \mathbb{N}^{\leqslant n}\}$ של כל החסמים של X היא לא ריקה, ולכן יש לה מינימום a. אם $a \notin X$, אז כל איברי X קטנים ממש מ-a. כיוון ש-X לא ריקה, בפרט $a > 0$, ולכן קיים ל-a קודם מיידי b, ו-A חסומה על-ידי b, בסתירה למינימליות של a. לכן $a \in X$ והוא המקסימום.

2. נוכיח ש-X עם הסדר המושרה היא מודל של הטבעיים. לפי ההנחה, אין ב-X מקסימום. אם $A \subseteq X$ לא ריקה, אז A גם תת-קבוצה של $\mathbb{N}$, ולכן יש לה מינימום (שהוא גם המינימום בסדר המושרה על X). נניח $x \in X$ אינו המינימום ב-X. אז הקבוצה $Y = \{y \in X \mid y < x\}$ לא ריקה וחסומה (על-ידי x) ולכן לפי הסעיף הקודם יש לה מקסימום. זהו לפי ההגדרה הקודם המיידי של x.

3. נניח ש-X חסומה. אפשר להניח שהיא לא ריקה, אז יש לה מקסימום m (לפי הסעיף הראשון). נגדיר $Y = X \cup \{n \in \mathbb{N} \mid n > m\}$. אז Y לא חסומה, ולכן לפי הסעיף הקודם, יש איזומורפיזם $g : Y \to \mathbb{N}$. נסמן ב-f את הצמצום של g ל-X. אז f פונקציה חד-חד-ערכית ועל $\mathbb{N}^{\leqslant g(m)}$: היא חח"ע כי היא צמצום של פונקציה חח"ע, אם $i \in X$ אז $i \leqslant m$ ולכן $f(i) \leqslant f(m) = g(m)$, כלומר התמונה של f אכן מוכלת ב-$\mathbb{N}^{\leqslant g(m)}$. היא על משום שאם k לא בתמונה, אז הוא גם לא בתמונה של g, כי g עולה, בסתירה לבחירת g.

הכיוון השני נובע מתרגיל 3.5.6. □

מסקנה 3.5.8. *אם X קבוצה סופית ו-$Y \subseteq X$, אז Y סופית ו-$|Y| \leqslant |X|$. אם $|X| = |Y|$, אז $Y = X$.*

סוף הרצאה 8, 29 במאי 2024