

רשימות אלגברה לינארית 2א
שחר פרץ ~ 2025B

Introduction 1

1.1 ~ הרבה מילים שאפשר לדלג עליהן

סיכום זה לאלגברה לינארית א2, נעשה במסגרת תוכנית אודיסאה, עם בן בסקין כמרצה. בגלל המון סיבות, כמו זו שאני לא לוקח את הקורס בסמסטר בו אני לומד אותו, והמלחמה עם איראן, הסיכום הזה כולל מגוון מקורות – ההרצאות של בן, הקלטות, סיכומים אחרים, הספר "Linear Algebra Done Right", ותרגומים של עומרי שדה-אור. פרט לכך הוספתי ציטוטים מן ההרצאה שמצאתי משעשעים. שכתבתי לחלוטין את הפרק על צורת ג'ורדן, במטרה לשפר את ההבנה של הקורא על הנושא, תוך הצגת שתי גישות להגדרת צורת ג'ורדן.

כנגד שלושה נושאים דיברה אלגברה לינארית א2 –

1. **אופרטורים ליניארים**, הן העתקות ממרחב לעצמו.
2. **תבניות בי-ליניאריות**, אובייקט מתמטי נוסף שניתן לייצג ע"י מטריצה.
3. **מרחבי מכפלה פנימית**, מרחבים בהם מוגדרת מעין תבנית סקווי בי-לינארית שמאפשרת תיאור "גודל", ובהם יש ערך לפירוק מטריצות לכפל של מספר מטריצות שונות.

נוסף על שלושת הנושאים ה"רגילים" של הקורס, מופיעה בסוף הרחבה של בן בסקין לגבי מרחבים דואלים. אני ממליץ בחום גם למי שלמד את הנושא בלינארית א1 לקרוא את הפרק עם מרחבים דואלים, משום שהוא קצר, ומראה קשרים חזקים (ומרתקים!) בין החומר הנלמד באלגברה לינארית א2 (כמו מרחבי מכפלה פנימית והעתקות צמודות) למרחבים דואלים. הוספתי בעצמי הרחבה לפירוק SVD.

באופן אישי, אני מוצא את הקורס די מעניין, ובמיוחד את הפרק האחרון בנוגע לפירוקים של מטריצות/העתקות.

הגרסה האחרונה של הסיכום תהיה זמינה **בקישור הבא** כל עוד מיקרוסופט לא פשטו את הרגל. אם מצאתם בסיכום טעויות (החל בתקלדות, כלה בשגיחות חטיב, ובטח טעויות מתמטיות) אשמח אם תפנו אלי בטלפון או במייל (perets.shahar@gmail.com), בטלפון (אם יש לכם אותו), או ב-issues ב-github (קישור בתחילת המשפט).

מקווה שתהנו מהסיכום ותמצאו אותו מועיל;

שחר פרץ, 19.7.2025

אני לא אחראי בשום צורה על דברים לא נכונים שכתבתי בטעות. פעמים רבות מרצים מדלגים עם שלבים ואני משלים מההבנה שלי, ולמרות שעברתי על הסיכום ואני משתדל שיהיה מדויק ככל האפשר, ייתכן שישנן טעויות.

1.2 ~ סימונים

בסיכום הבא נניח את הסימונים הבאים:

- $[n] := \mathbb{N} \cap [0, n]$
- בהינתן $T: V \rightarrow W$ העתקה ו- $U \subseteq V$ תמ"י, נסמן $T(U) := \{Tu \mid u \in U\}$
- בהינתן $T: V \rightarrow W$ העתקה ו- $v \in V$, נסמן $Tv := T(v)$
- בהינתן A קבוצה עם יחס שקילות \sim , נסמן את קבוצת המנה ב- A/\sim
- בפקולטה למתמטיקה בת"א מקובל להשתמש ב- (v, w) בשביל מכפלה פנימית. בסיכום הזה אשתמש ב- $\langle v \mid w \rangle$, גם כן סימון מקובל (בעיקר בפיזיקה), שאני חושב שנראה מגניב הרבה יותר.
- נסמן שחלוף (transpose) ב- A^T ולא A^t .
- הטבעיים כוללים את 0, ו- \mathbb{N}_+ הטבעיים החיוביים אינם.

תוכן העניינים

2	1 מבוא
2	1.1 הרבה מילים שאפשר לדלג עליהן
2	1.2 סימונים
5	2 לכסון
5	2.1 מבוא לפרק
5	2.2 ערכים עצמיים ווקטורים עצמיים לאופרטורים לינארים
6	2.3 ערכים עצמיים ווקטורים עצמיים למטריות
7	2.4 פולינום אופייני
9	2.5 על הקשר בין ריבוי גיאומטרי ואלגברי
9	2.5.1 פיבונאצ'י בשדה סופי
10	2.6 שילוש
11	2.7 על ההבדל בין פולינום לפולינום
11	2.8 משפט קיילי-המילטון
13	3 תורת החוגים
13	3.1 מבוא והגדרות בסיסיות
13	3.2 ראשוניות ואי-פריקות
16	3.3 הרחבת שדות
17	3.4 חוג הפולינומים
18	3.4.1 פונקציות רציונליות ומספרים אלגבריים
20	4 פירוק פרימרי
20	4.1 מרחבים T -שמורים וציקליים
21	4.2 הפולינום המינימלי
23	4.3 ניסוח והוכחת משפט הפירוק הפרימרי
26	5 צורת ג'ורדן
26	5.1 מציאת שורשי פולינום אופייני ממעלה חמישית ואילך
26	5.2 צורת ג'ורדן לאופרטור לינארי נילפוטנטי
26	5.2.1 נילפוטנטיות
27	5.2.2 שרשאות וציקליות
29	5.2.3 ניסוח צורת מייקל ג'ורדן לאופרטור נילפוטנטי
31	5.3 צורת ג'ורדן לאופרטור לינארי כללי
31	5.3.1 בעזרת פירוק פרימרי
32	5.3.2 בעזרת מרחביים עצמיים מוכללים
34	5.4 תוצאות מצורת ג'ורדן
35	6 תבניות בי-לינאריות
35	6.1 הגדרות בסיסיות בעבור תבניות בי-לינאריות כלליות
37	6.2 חפיפה וסימטריות
38	6.3 תבנית ריבועית
39	6.4 משפט ההתאמה של סילבסטר
41	7 מרחבי מכפלה פנימית
41	7.1 הגדרה כללית
41	7.1.1 מעל \mathbb{R}
41	7.1.2 מעל \mathbb{C}
42	7.2 אורתוגונליות
42	7.2.1 משפט פיתגורס ותוצאותיו
43	7.3 מרחבים ניצבים והיטלים
45	7.3.1 אלגוריתם גרהם-שמידט
46	7.4 צמידות
46	7.4.1 העתקה צמודה לעצמה
48	7.4.2 העתקה צמודה להעתקה
50	8 פירוקים
50	8.1 המשפט הספקטרי להעתקות
50	8.1.1 ניסוח המשפט הספקטרי להעתקות צמודות לעצמן

51	ניסוח המשפט הספקטרי בעבור העתקה כללית	8.1.2
52	תוצאות ממשפט הפירוק הספקטרי	8.1.3
54	מטריצות אוניטריות	8.2
56	צורה קאנונית למטריצה אורתוגונלית	8.2.1
57	המשפט הספקטלי בניסוח מטריציוני	8.2.2
57	פירוק פולארי	8.3
57	מבוא, וקישור לתבניות בי-לינאריות	8.3.1
59	ניסוח הפירוק הפולארי	8.3.2
60	פירוק SVD	8.4
60	ניסוח והוכחת SVD	8.4.1
61	הרחבת SVD להעתקות שאינן אופרטורים	8.4.2
63	נורמה של העתקה	8.4.3

9 אלגוריתמים נפוצים

64	אלגוריתמים מרכזיים	9.1
64	לכסון	9.1.1
64	ג'ירדון	9.1.2
64	אלגוריתם גראם-שמידט	9.1.3
65	מספר אלגוריתמים נוספים	9.2

10 מרחבים דואלים

66	הגדרות בסיסיות	10.1
66	איזומורפיות למרחבי מכפלה פנימית	10.2
66	העתקה צמודה (דואלית)	10.2.1
68	המאפס הדואלי ומרחב אורתוגונלי	10.2.2

בתיאבון

Diagonalization 2

2.1 ~ מבוא לפרק

הגדרה 1. נאמר ש- A מטריצה אלכסונית, אם:

$$A = \begin{pmatrix} \lambda_1 & & \\ & \lambda_2 & \\ & & \ddots \\ & & & \lambda_n \end{pmatrix} =: \text{diag}(\lambda_1, \lambda_2 \dots \lambda_n)$$

נאמר שישנה פעולה כשהי שנרצה להפעיל. נרצה לקרות מה יקרה לפעולה לאחר שנפעיל אותה מספר פעמים. כפל מטריצות היא פעולה מסדר גודל של $O(n^3)$. אך, ישנן מטריצות שקל מאוד להעלות בריבוע, ובכך נוכל להפוך את ההליך לפשוט בהרבה, ואף לנסח אותו בצורה של נוסחה סגורה פשוטה. דוגמה מטריצה כזו היא מטריצה אלכסונית. ננסה למצוא דרך, להמיר" בין מטריצה "רגילה" למטריצה אלכסונית.

הגדרה 2. ו- T ההעתקה אלכסונית:

$$T_A^m(A) = A^m(v) = \begin{pmatrix} \lambda_1^m & & \\ & \ddots & \\ & & \lambda_n^m \end{pmatrix}$$

למה זה מועיל? נזכר בסדרת פיבונצ'י. נתבונן בהעתקה הבאה:

$$\begin{pmatrix} a_{n+2} \\ a_{n+1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_{n+1} \\ a_n \end{pmatrix} \implies \begin{pmatrix} a_n \\ a_{n-1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}^{n-1} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}$$

(בהנחת איברי בסיס $a_0 = 0, a_1 = 1$).

ואכן, מה חבל שלא כיף להכפיל את המטריצה $\begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}$ בעצמה המון פעמים. מה נוכל לעשות? ננסה למצוא בסיס שבו $\begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} = P^{-1} \Lambda P$ ו- $\begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}_B = (v_1, v_2)$. [המשמעות של Λ היא מטריצה אלכסונית כלשהי] אז נקבל:

$$\begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}^n = (P^{-1} \Lambda P)^n = P^{-1} \Lambda^n P$$

(די קל להראות את השוויון האחרון באינדוקציה). במקרה כזה יהיה נורא נחמד כי אין בעיה להעלות לכסינה בחזקה.

הדבר הנחמד הבא שנוכל ליצור הוא צורת ג'ורדן - מטריצת בלוקים אלכסונית, ככה שנעלה בחזקה את הבלוקים במקום את כל המטריצה. נעשה זאת בהמשך הקורס.

הגדרה 3. אופרטור ליניארי (א"ל) הוא ה"ל/טל ממרחב וקטורי V לעצמו.

2.2 ~ ערכים עצמיים ווקטורים עצמיים לאופרטורים לינארים

הגדרה 4. יהי $T: V \rightarrow V$ א"ל. אז $0 \neq v \in V$ נקרא וקטור עצמי של T (ו"ע) אם קיים $\lambda \in \mathbb{F}$ כך ש- $Tv = \lambda v$.

הגדרה 5. λ מההגדרה הקודמת נקרא ערך עצמי (ע"ע) של T , המתאים לו"ע v .

שאלה. יהי $T: \mathbb{F}^n \rightarrow \mathbb{F}^n$. נניח ש- $V = (v_1 \dots v_n)$ בסיס של ו"ע של T [תיאורטית יכול להתקיים באופן ריק כי עדיין לא הראינו שקיים בסיס כזה] אז קיימת $P \in M_n(\mathbb{F})$ הפיכה כך ש- A המקיימת $Tv = Av$ לפי הבסיס הסטנדרטי, אז $[T]_B^B = \text{diag}(\lambda_1 \dots \lambda_n)$, כאשר $\lambda_1 \dots \lambda_n$ ע"ע המתאימים לו"ע $v_1 \dots v_n$.

כדאי לדעת כי $\text{Hom}(\mathbb{F}^n, \mathbb{F}^n) \cong M_{n \times n}(\mathbb{F})$. מה המשמעות של איזומורפי (\cong) ? בהינתן A, B מבנים אלגבריים כלשהם, נסמן $A \cong B$ אם קיימת $\varphi: A \rightarrow B$ העתקה חח"ע ועל שמשמרת את המבנה (כאשר המבנה שלנו מורכב מפעולות חיבור וכפל, העתקה כזו תהיה ליניארית).

דוגמה. אם V, U מ"ו מעל \mathbb{F} , הם נקראים איזומורפים אם קיימת $\varphi: V \rightarrow U$ חח"ע ועל המקיימת

$$\forall \lambda_1, \lambda_2 \in \mathbb{F} \forall v_1, v_2 \in V: \varphi(\lambda_1 v_1 + \lambda_2 v_2) = \lambda_1 \varphi(v_1) + \lambda_2 \varphi(v_2)$$

כלומר "המרנו" שני מבנים אלגבריים, אבל לא באמת עשינו שום דבר - כל מבנה עדיין שומר על התכונות שלו.

סימון 1. בסוף הסיכום מופיעה הרחבה על תופעות מעין אלו.

הגדרה 6. יהי $T: V \rightarrow V$ א"ל, נניח $\lambda \in \mathbb{F}$ ע"ע, אז המרחב העצמי (מ"ע) של λ הוא:

$$V_\lambda := \{v \in V \mid Tv = \lambda v\}$$

משפט 1. V_λ תמ"ו של V .

הגדרה 7. יהי $T: V \rightarrow V$ א"ל, ויהי $\lambda \in \mathbb{F}$ ע"ע של T . נגדיר את הריבוי הגיאומטרי של λ (ביחס ל- T) הוא $\dim V_\lambda$.

דוגמה. יהי V מ"ו מממד n , $T: V \rightarrow V$ א"ל. נניח קיום $v \in V$ המקיים $T^n v = v$, ונניח $\{v, Tv, T^2v, \dots, T^{n-1}v\}$ בסיס של V . ננסה להבין מהם הע"ע.

יהי $u \in V$, $0 \neq u$ ו"ע כך ש- $Tu = \lambda u$. נראה כי $T^n u = u$. ידוע קיום $\alpha_0, \dots, \alpha_{n-1} \in \mathbb{F}$ כך ש- $u = \sum \alpha_i T^i(v)$. אז:

$$\lambda^n u = T^n(u) = \sum_{i=0}^{n-1} \alpha_i \underbrace{T^{n+i}(v)}_{=T^i(T^n v)=T^i v} = u$$

נבחין שהוקטורים העצמיים הם שורשי היחידה. מי הם שורשי היחידה – זה תלוי שדה.

מסקנה 1. ערכים עצמיים תלויים בשדה. ערכים עצמיים של מטריצה מעל \mathbb{R} יכולים להיות שונים בעבור אותה המטריצה מעל \mathbb{C} . דוגמה יותר פשוטה לכך היא העתקת הסיבוב ב- \mathbb{R}^2 , שאין לה ו"עים מעל \mathbb{R} אך יש כאלו מעל \mathbb{C} .

משפט 2. תהי $T: V \rightarrow V$ א"ל, ונניח $A \subseteq V$ קבוצה של ו"ע של T עם ע"ע שונים, אז A בת"ל. הוכחה בתרגול.

הגדרה 8. יהי $T: V \rightarrow V$ א"ל. נאמר ש- T ניתן לכסון/לכסין אם קיים V -בסיס של ו"ע של T .

מסקנה 2. אם $\dim V = n$ ול- T יש n ע"ע שונים אז T לכסין.

הערה 1. שימו לב – ייתכן מצב בו קיימים פחות מ- n ע"ע שונים אך T עדיין לכסין. דוגמה: $id, 0$.

מסקנה 3. תהי $T: V \rightarrow V$ א"ל. נניח שלכל λ ע"א, ישנה $B_\lambda \subseteq V_\lambda$ בת"ל. אז $B = \bigcup_\lambda B_\lambda$ בת"ל.

הוכחה. ניקח צירוף לינארי כלשהו שווה ל-0:

$$\begin{aligned} \sum_{v_i \in B} \alpha_i v_i &= 0 \\ &= \sum_\lambda \sum_{\lambda_i} \alpha_i v_{\lambda_i} \\ &\implies \sum_{\lambda_j} \alpha_i v_{\lambda_j} =: u_j \in V_{\lambda_j} \\ &\implies \sum_j u_j = 0 \end{aligned}$$

קיבלנו צירוף לינארי לא טריויאלי של איברים במ"ע שונים (=עם ע"א שונים). אם אחד מהם אינו 0, קיבלנו סתירה למשפט. סה"כ קיבלנו שלכל j מתקיים $\sum \alpha_{ji} v_{ji} = 0$. בגלל ש- $v_{ji} \in B_j$ אז בת"ל ולכן כל הסקלרים 0. ■

הערה 2. ההוכחה הזו עובדת בעבור ההכללה לממדים שאינם נוצרים סופית.

מסקנה 4. יהי $T: V \rightarrow V$ א"ל כך ש- $\dim V = n$. אז:

$$\sum_\lambda \dim V_\lambda \leq n$$

שוויון אמ"מ T לכסין.

הוכחה. לכל λ יהא B_λ בסיס. אז $B = \sum_\lambda B_\lambda$ בת"ל. אז $\dim B = \sum_\lambda \dim V_\lambda$. $n \geq |B|$.

אם T לכסין אז קיים בסיס של ו"ע כך שאכל אחד מהם מבין V_λ ושוויון.

מצד שני, אם יש שוויון אז B קבוצה בת"ל של n ו"ע ולכן בסיס ולכן T לכסין. ■

2.3 ~ ערכים עצמיים ווקטורים עצמיים למטריצות

הגדרה 9. תהי $A \in M_n(\mathbb{F})$. נאמר ש- $v \in \mathbb{F}^n$, $0 \neq v$ הוא ו"ע של A עם ע"ע λ אם $Av = \lambda v$.

משפט 3. תהי $T: V \rightarrow V$ א"ל ויהי B בסיס סדור, ו- V נוצר סופי (לעיתים יקרא: סוף-ממדי). נניח $A = [T]_B$. אז $0 \neq v$ וקטור עצמי של T עם ערך עצמי λ אמ"מ $[v]_B$ וקטור עצמי של A עם ע"ע λ .

הוכחה. גרירה דו-כיוונית. נניח V ו"ע של T . אז $A[v]_B = [Tv]_B = [\lambda v]_B = \lambda [v]_B$. מהכיוון השני "לכו הפוך". ■

הגדרה 10. מטריצה $A \in M_n(\mathbb{F})$ תקרא לכסינה/נתנת ללכסון אם היא דומה למטריצה $\Lambda \in M_n(\mathbb{F})$ אלכסונית, כלומר קיימת $P \in M_n(\mathbb{F})$ הפיכה שעבורה $\Lambda = P^{-1}AP$.

משפט 4. יהיו $A, P \in M_n(\mathbb{F})$. נניח P הפיכה. אז אם $P^{-1}AP = \text{diag}(\lambda_1, \dots, \lambda_n)$ אמ"מ עמודות P הן ו"ע של A עם ע"ע $\lambda_1 \dots \lambda_n$ בהתאמה.

הוכחה. נסמן $P = (P_1 \dots P_n)$ עמודותיה. אז:

$$AP = (AP_1 \dots AP_n) = (\lambda_1 P_1 \dots \lambda_n P_n) = P \underbrace{\begin{pmatrix} \lambda_1 & & \\ & \ddots & \\ & & \lambda_n \end{pmatrix}}_{\Lambda}$$

ולכן:

$$P^{-1}AP = P^{-1}P\Lambda$$

ההוכחה מהכיוון השני היא לקרוא את זה מהצד השני.

"אני מקווה שראיתם שכפל מטריצה באלכסונית מתחלף" (הוא לא בהכרח). "אני אמרתי שטות". \sim בן

משפט 5. בהינתן העתקות T, S שתיהן לכסינות לפי אותו הבסיס B (לא בהכרח אותם הע"ע), אז $TS = ST$ מתחלפות.

משפט 6. המטריצה λI עבור $\lambda \in \mathbb{F}$ דומה רק לעצמה.

הוכחה. בהינתן P הפיכה, הכפל של P עם λI מתחלף בהכרח, ולכן $P^{-1}\lambda I P = PP^{-1}\lambda I = \lambda I$ לכל מטריצה $P^{-1}\lambda I P$.
דומה.

2.4 \sim פולינום אופייני

תרגיל. תהי $A = \begin{pmatrix} -7 & 8 \\ 6 & 7 \end{pmatrix}$. מצאו ו"ע וע"ע של A ולכסנו אם אפשר.

פתרון. מחפשים $\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} \in \mathbb{R}^2 \setminus \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}$ ו- $\lambda \in \mathbb{R}$ כך ש-:

$$\begin{aligned} A \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} &= \lambda \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} \\ A \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} &= \lambda I \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} \\ \lambda I \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} - A \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} &= 0 \\ (\lambda I - A) \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} &= 0 \end{aligned}$$

סה"כ $\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}$ ו"ע עם ו"ע λ אמ"מ $\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} \in \ker(\lambda I - A)$, אמ"מ $\lambda I - A$ לא הפיכה, אמ"מ $\det(\lambda I - A) = 0$ AKA "הפולינום האופייני". במקרה הזה:

$$\lambda I - A = \begin{pmatrix} \lambda + 7 & -8 \\ -6 & \lambda - 7 \end{pmatrix} \implies \det(\lambda I - A) = (\lambda + 7)(\lambda - 7) = \lambda^2 - 1$$

לכן הע"ע הם ± 1 . נמצא את הו"ע. עבור $\lambda = 1$, מתקיים:

$$\begin{pmatrix} 8 & 8 \\ -6 & -6 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = 0$$

יש לנו חופש בחירה (ופתרון יחיד עד לכדי כפל בסקלר). במקרה הזה, נבחר $\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ -1 \end{pmatrix}$.

עבור $\lambda = -1$, יתקיים:

$$\begin{pmatrix} 6 & 8 \\ -6 & 8 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = 0 \iff b \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 4 \\ -3 \end{pmatrix}$$

ראינו שהמלכסנת היא העמודות של הו"ע. אז:

$$P = \begin{pmatrix} 1 & 4 \\ -1 & -3 \end{pmatrix}$$

וסה"כ $P^{-1}AP = I$. מכאן צריך למצוא את P^{-1} .

משפט 7. תהי $A \in M_n(\mathbb{F})$ אז $\lambda \in \mathbb{F}$ ע"ע של A אמ"מ $|\lambda I - A| = 0$.

הגדרה 11. תהי $A \in M_n(\mathbb{F})$. הפולינום האופייני של A מוגדר להיות:

$$f_A(x) = |xI - A|$$

משפט 8. תהי $A \in M_n(\mathbb{F})$. אז $f_A(x)$ הוא פולינום מתוקן [=מקדם מוביל הוא 1] ממעלה n , המקדם של x^{n-1} הוא $-\text{tr } A$ והמקדם החופשי הוא $(-1)^n |A|$.

הגדרה 12. בעבור $A \in M_n(\mathbb{F})$ הפולינום האופייני של A הוא $f_A(x) = \det(Ix - A)$.

ראינו ש- v ו"ע של A עם ערך עצמי λ אמ"מ $v \in \ker(\lambda I - A)$, וכן λ ע"ע אמ"מ $\dim \ker \lambda - A > 0$.

משפט 9. $f_A(x)$ פולינום מתוקן (מקדם מוביל 1) מדרגה n , המקדם של x^{n-1} הוא $-\text{tr } A$, המקדם החופשי הוא $(-1)^n \det A$.

הוכחה.

• **תקינות הפולינום.** מבין $n!$ המחזורים, ישנו אחד יחיד שדרגתו היא n . הסיבה היא שמדטרמיננטה לפי תמורות, התמורה היחידה שתיצור איבר מסדר x^n היא תמורת הזהות שתעבור על האלכסון. באינדוקציה על n , ונקבל:

$$f_A(x) = (x - a_{11}) \cdots (x - a_{nn}) = x^n + \cdots$$

באופן דומה אפשר להוכיח באינדוקציה באמצעות פיתוח לפי שורות:

$$f_A(x) = (x - a_{11})|A_1| + \underbrace{a_{21}|A_2| - a_{31}|A_3| + \cdots + (-1)^{n+1}a_{n1}|A_n|}_{\text{מהא. דרגה קטנה מ-} n}$$

סה"כ גם כאן הראינו שהדרגה מתקבלת מהפולינום $\prod_{i=1}^n (x - a_{ii})$, כלומר הפולינום האופייני מתוקן.

• **המקדם של x^{n-1} הוא $-\text{tr } A$.** מקדמי x^{n-1} מגיעים גם הם רק מ- $\prod_{i=1}^n (x - a_{ii})$ (הפולינום למעלה) שהם $-\text{tr } A = \sum_{i=1}^n -a_{ii}$. המקדם החופשי.

• **המקדם החופשי.** מתקבל מהצבת 0. $f_A(0) = \det(I \cdot 0 - A) = \det(-A) = (-1)^n \det A$.

■

דוגמאות.

(א) אם $A = \begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix}$ אז $f_A(x) = x^2 - (a + d)x + ad - bc$ (נטו מהמשפט הקודם).

(ב) אם $A = \text{diag}(\lambda_1 \dots \lambda_n)$ אז $f_A(x) = \prod_{i=1}^n (x - \lambda_i)$.

(ג) אם $A = \begin{pmatrix} \lambda_1 & & * \\ & \ddots & \\ 0 & & \lambda_n \end{pmatrix}$ אז גם כאן $f_A(x) = \prod_{i=1}^n (x - \lambda_i)$ אך כדאי לשים לב שמשולשית עליונה לא בהכרח דומה לאלכסונית עם אותם הקבועים.

(ד) אם $A = \begin{pmatrix} B & * \\ 0 & C \end{pmatrix}$ כאשר B, C בלוקים ריבועיים אז $f_A(x) = f_B(x) \cdot f_C(x)$.

הגדרה 13. בהינתן $T: V \rightarrow V$ ט"ל נגדיר את הפולינום האופייני שלה (פ"א) באופן הבא: נבחר בסיס B למ"ו V , ונתבונן ב- $A = [T]_B$ ונגדיר את $f_T(x) := f_A(x)$.

"אתה פותר עכשיו שאלה משיעורי הבית" "אל תדאג הבודק כבר שלח פתרון" "מה?"

משפט 10. הפ"א של ט"ל מוגדר היטב. למטריצות דומות אותו פ"א. הוכחה. בשיעורי הבית. ויש סיכוי שגם בדף הסיכום.

דוגמה. נתבונן בהעתקה $T(f) = f'$, $\mathbb{R}_n[x] \rightarrow \mathbb{R}_n[x]$, נבחר בסיס $B = (1, x, \dots, x^n)$. אז:

$$[T]_B = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 2 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 3 & \ddots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & & \end{pmatrix}$$

אז:

$$f_T(x) = \det \begin{pmatrix} x & -1 & 0 & \dots \\ & x & -2 & 0 & \dots \\ & & \ddots & \ddots & \end{pmatrix} = x^{n+1}$$

משפט 11. $T: V \rightarrow V$ ט"ל, אז λ ע"ע של T אמ"מ $f_T(\lambda) = 0$.

הוכחה. יהא $B \subseteq V$ בסיס של V . אז $A = [T]_B$ ואז $f_T(\lambda) = 0$ אמ"מ $f_A(\lambda) = 0$ ע"ע של A . ■

הגדרה 14. יהי $\lambda \in \mathbb{F}$ ע"ע של T (או A). הריבוי האלגברי של λ הוא החזקה המקסימלית d כך ש- $(x - \lambda)^d \mid f_T(x)$ (חלוקת פולינומים).

דוגמה. בעבור T היא העתקת גזירת פולינום, הפ"ע $f_T(x) = x^{n+1}$ ולכן ע"ע יחיד הוא 0. הריבוי האלגברי של 0 הוא $n + 1$. הריבוי הגיאומטרי של 0 הוא 1.

סימון 2. נניח ש- λ ע"ע של T (או A) אז d_λ הריבוי האלגברי של λ ו- r_λ הריבוי הגיאומטרי של λ .

2.5 ~ על הקשר בין ריבוי גיאומטרי ואלגברי

הערה 3. במקרים רבים $\sum d_i = n$ כאשר n דרגת הפולינום. זה לא תמיד המצב.

דוגמה למצב בו זה לא קורה: $x^2(x^2 + 1) \in \mathbb{R}[x]$. סכום הריבויים האלגבריים הוא 2, אבל דרגת הפולינום היא 4. זה נכון מעל שדות סגורים אלגברית.

משפט 12. תהי $T: V \rightarrow V$ ט"ל. אזי לכל ע"ע λ מתקיים $r_\lambda \leq d_\lambda$.

הוכחה. יהי λ ע"ע. אז $V_\lambda = \{v \in V \mid Tv = \lambda v\}$. יהי $B_\lambda \subseteq V_\lambda$ בסיס עבור V_λ . נשלים אותו לבסיס B של V .

$$[T]_B = \begin{pmatrix} \lambda & 0 & * \\ & \lambda & \\ 0 & & \ddots \\ * & & & C \end{pmatrix}$$

ואז:

$$f_T(x) = (x - \lambda)^{r_\lambda} C(x) \implies r_\lambda \leq d_\lambda$$

■

משפט 13. תהי $T: V \rightarrow V$ ט"ל עם פ"א $f_T(x)$. אז T לכסינה אמ"מ שתי הטענות הבאות מתקיימות:

1. בעבור k הע"ע שונים, $f_T(x) = \prod_{i=1}^k (x - \lambda_i)^{n_i}$

2. לכל λ ע"ע של T מתקיים $r_\lambda = d_\lambda$

(הבהרה: 1 לא גורר את 2. צריך את שניהם).

הוכחה.

\Leftarrow לכסינה ראינו ש-1 מתקיים. במקרה שלכסינה ראינו ש- $n = \sum r_{\lambda_i} \leq \sum d_{\lambda_i} = n$ ולכן אם לאחד מבין הערכים העצמיים מתקיים $r_k \neq d_k$ אז מתקיים $r_k < d_k$ ונקבל סתירה לשוויונות לעיל.

\Rightarrow

$$1 \implies \sum d_{\lambda_i} = n$$

$$2 \implies \sum r_{\lambda_i} = \sum d_{\lambda_i} = n$$

■

וסה"כ $\sum r_{\lambda_i} = n$ אמ"מ T לכסינה.

2.5.1 פיבונאצ'י בשדה סופי

סדרת פיבונאצ'י:

$$\begin{pmatrix} a_{n+1} \\ a_n \end{pmatrix} = \underbrace{\begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}}_{=0}^n \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}$$

נניח שאנו מסתכלים מעל \mathbb{F}_p כלשהו. אז הסדרה חייבת להיות מחזורית. **שאלה:** מתי מתקיים ש- $A^m = I$ (בעבור m מינימלי)? במילים אחרות, מתי מתחילים מחזור.

היות שמספר הזוגות השונים עבור $\begin{pmatrix} a_{n+1} \\ a_n \end{pmatrix}$ הוא p^2 , אז $m \leq p^2$. עבור $p = 7$: $0, 1, 1, 2, 3, 4, 5, 1, 6, 0, 6, 6, 5, 4, 2, 6, 1, 0, 1$. - כלומר עבור $p = 7$ יש מחזור באורך $m = 16$.

הערה 4. תירואטית עם המידע הנוכחי ייתכן ויהפוך למחזורי ולא יחזור להתחלה
טענה. אם p ראשוני אז $p \equiv 1 \pmod{5}$ אז אורך המחזור חסום מלעיל ע"י $p-1$.
 הוכחה. תנאי מספיק (אך לא הכרחי) לקבלת מחזור באורך k הוא $A^k = I$. אז:

$$f_A(x) = x^2 - x - 1$$

יש דבר שנקרא "הדדיות ריבועית" (חומר קריאה רשות במודל) שמבטיחה שורש לפולינום להלן עבור p כנ"ל. אכן יש לנו שני
 ע"ע שונים (אם קיים רק אחד אז סתירה מהיות הדיסקרימיננטה $5 = 0$ אך $p \not\equiv 1 \pmod{5}$). לכן קיימת P הפיכה כך ש-:

$$P^{-1}AP = \begin{pmatrix} \lambda_1 & 0 \\ 0 & \lambda_2 \end{pmatrix}$$

כך ש- $\lambda_1, \lambda_2 \neq 0$. משפט פרמה הקטן אומר ש- $\lambda_1^{p-1} = \lambda_2^{p-1} = 1$ ואז $A^{p-1} = I$. ■

2.6 ~ שילוש

הגדרה 15. $T: V \rightarrow V$ ט"ל ניתנת לשילוש אם קיים בסיס B ל- V כך ש- $[T]_B$ משולשית.

הערה 5. אם T ניתנת לשילוש אז הפולינום האופייני שלה מתפרק לגורמים ליניאריים (האם איברי האלכסון של הגרסה המשולשית). יהיה מעניין לשאול אם הכיוון השני מתקיים.

משפט 14. $T: V \rightarrow V$ ט"ל. נניח ש- $f_T(x) = \prod_{i=1}^n (x - \lambda_i)$ (ניתנת לפירוק לגורמים ליניאריים) אז T ניתנת לשילוש.

הוכחה. בסיס. $n = 1$ היא כבר משולשית וסיימנו.
 צעד. נניח שהטענה נכונה בעבור n טבעי כלשהו, ונראה נכונות עבור $n+1$. אז f_T מתפרק לגורמים ליניאריים, לכן יש
 לו שורש. יהי λ ע"ע של T . בסיס B של V מקיים ש- $[T]_B$ משולשית עליונה (נסמן $B = (w_1 \dots w_{n+1})$) אז $T(w_i) \in \text{span}(w_1 \dots w_i)$. נגדיר את w_1 להיות ו"ע של λ . נשלימו לבסיס B^1 .

$$[T]_B = \begin{pmatrix} \lambda & * & & \\ 0 & \vdots & & \\ \vdots & \dots & C & \dots \\ 0 & & \vdots & \end{pmatrix}$$

אז ניתן לומר כי:

$$f_T(x) = (x - \lambda)f_C(x)$$

נסמן $w = \text{span}(w_2 \dots w_{n+1})$. קיימת העתקה ליניארית $S: W \rightarrow W$ כך ש- $f_S(x) = f_C(x)$. לפי ה"א קיים בסיס ל- W
 הוא B'' שעבורו S משולשית עליונה. נטען ש- $B = B'' \cup \{w_1\}$ ייתן את הדרוש.

$$\forall w \in B'': (T - S)(w) = Tw - Sw = aw_1 + S(w) - S(w) = aw_1$$

(כלומר, השורה העליונה של $[T]_B$ "תרמה" את aw_1 בלבד) לכן:

$$(T - S)w \subseteq \text{span}(w_1)$$

זה גורר שלכל $w \in W$ מליניאריות מתקיים ש- $(T - S)w \subseteq \text{span}(w_1)$. סה"כ לכל $w \in B'' \cup \{w_1\}$ מתקיים $T(w_i) \in \text{span}(w_1 \dots)$. ■

בהוכחה הזו, בנינו בסיס כך ש-:

$$[T(w) - S(w)]_B = ae_1$$

הגדרה 16. מטריצה ניתנת לשילוש אם היא דומה למשולשית.

משפט 15. מטריצה A ניתנת לשילוש, אם"מ הפ"א האופייני שלה מתפצל לגורמים לינאריים.

המשך בעמוד הבא

2.7 ~ על ההבדל בין פולינום לפולינום

נבחין ש- $\mathbb{F}[x]$ הוא מ"ו מעל \mathbb{F} . וכן $\mathbb{F}[x]$ הוא חוג חילופי עם יחידה. בחוג כפל לא חייב להיות קומטטיבי (נאמר, חוג המטריצות הרביעיות). אומנם קיימת יחידה (פולינום קבוע ב-1) אך אין הופכיים לשום דבר חוץ מלפונ' הקבועות. שזה מאוד חבל כי זה כמעט שדה. בהמשך, נגדיר את אוסף הפונקציות הרציונליות כדי להתגבר על כך.

אם נתבונן במטריצות דומות, יש הבדל בין להגיד $f_A(x) \in \mathbb{F}[x]$, אך אפשר לטעון $f_A(x) = |B|$ כש- $B \in M_n(\mathbb{F}(x))$. למה? כי $xI - A \in M_n(\mathbb{F}(x))$ (זה קצת מנוון כי איברי המטריצה הם או פולינומים קבועיים או ממעלה 1). משום שדטרמיננטה שולחת איבר לשדה, אז $|B| \in \mathbb{F}(x)$. כך למעשה נגיע לכך שפולינומים אופייניים שווים כשני איברים בתוך השדה, ולא רק באיך שהם מתנהגים ביחס לקבועיים.

דוגמה:

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \in M_2(\mathbb{F}_2), f(x) = x^3, g(x) = x, f, g \in \mathbb{F}_2 \rightarrow \mathbb{F}_2 \implies f = g$$

אך:

$$f(A) = A^3 = 0, g(A) = A \neq 0$$

זה לא רצוי. נבחין בשני שוויונות שונים - שוויון פונקציות, בהם $f = g$ מעל \mathbb{F}_2 , ושוויון בשדה - בו $f - g \neq 0$ (כי $-x^2$ לא פולינום האפס, ואף מעל \mathbb{F}_2) ולכן ב- $\mathbb{F}_2(x)$ מתקיים $f \neq g$.

2.8 ~ משפט קיילי-המילטון

הגדרה 17. יהי $f(x) = \sum_{i=0}^d a_i x^i \in \mathbb{F}[x]$, V מ"ו מעל \mathbb{F} נ"ס (נוצר סופית) וכן $T: V \rightarrow V$ ט"ל. נגדיר:

$$f(T) = \sum_{i=0}^d a_i T^i, T^0 = id, T^n = T \circ T^{n-1}$$

כנ"ל עם מטריצות (ראה תרגול)

טענה. אם $A = [T]_B$ ו- $f(x) \in \mathbb{F}[x]$, אז $[f(T)]_B = f(A)$. הוכחה נובעת מהתכונות $[TS]_B = AC$, $[T + S]_B =$ הוכחה נובעת מהתכונות $A + C$, $[S]_B = C < [T]_B = A$.

טענה. אם $f, g \in \mathbb{F}[x]$ ו- $T: V \rightarrow V$ ט"ל, אז $(f \cdot g)(T) = f(T) \cdot g(T)$. באופן דומה $(f + g)(T) = f(T) + g(T)$.
לכן קל לראות ש- $f(A) = 0 \iff f(T) = 0$.

מסקנה 5. אם A, C דומות אז $f(A) = 0 \iff f(C) = 0$.

דוגמה. (מנוונת) נתבונן ב- $D: \mathbb{F}_n[x] \rightarrow \mathbb{F}_n[x]$ אופרטור הגזירה. ראינו $f_D(x) = x^{n+1}$ (הפולינום האופייני). אז נקבל:

$$f_D(D)(p) = p^{(n+1)} = 0 \implies f_D(D) = 0$$

משפט 16 (משפט קיילי-המילטון). תהי $T: V \rightarrow V$ ט"ל (נ"ס) או $A \in M_n(\mathbb{F})$, ו- $f_A(x) = f_T(x)$ הפ"א, אז $f_T(T) = 0$, $f_A(A) = 0$.

הערה 6. באנגלית: Cayley-Hamilton

הוכחה. נוכיח את המשפט בשלושה שלבים -

- נניח ש- T ניתנת לשילוש. אזי, קיים בסיס $B = (v_1 \dots v_n)$ כך ש- $[T]_B$ משולשית (עליונה). זאת מתקיים אמ"מ $\forall i \in [n]: T v_i \in \text{span}(v_1 \dots v_i)$. נפנה להוכיח את משפט קיילי-המילטון למקרה זה.

תת-הוכחה.

- נסיק: בעבור $n = 1$, אז קיים $\lambda \in \mathbb{F}$ כך ש- $f_T(T) = T - \lambda I = 0$ (העתקה לינארית חד ממדית היא כפל בסקלר). בפרט $\forall v \in V: (T - \lambda)v = 0$.

- צעד: נניח ש- $B = (v_1 \dots v_n, v_{n+1})$ שעבורו $[T]_B$ משולשית. נגדיר תמ"ו $W = \text{span}(v_1 \dots v_n)$ כך ש- $\dim W \leq \dim V$, ועבורו נכון $\forall w \in W: Tw \in W$ (ניתן להראות שזה נכון עבור וקטורי הבסיס, ונכון לכל $w \in W$ מלינאריות). נגדיר $T|_W: W \rightarrow W$ את הצמצום של T ל- W . ידוע ש- $T|_W$ ניתנת לשילוש ולכן מקיימת את תנאי האינדוקציה. לכן, $\forall w \in W: f_{T|_W}(T)(w) = 0$. אזי $f_T(x) = \prod_{i=1}^n (x - \lambda_i)$ וסה"כ $f_T(x) = \prod_{i=1}^n (x - \lambda_{n+1}) f_{T|_W}(x)$ וקיבלנו $\forall w \in W: f_T(T)(w) = 0$.

מספיק להראות ש- $(T - \lambda_{n+1})v \in W$ $\forall v \in V$. למה? כי:

$$f_T(T)(v) = \left(\prod_{i=1}^n (T - \lambda_i) \right) (T - \lambda_{n+1})(v)$$

מלינאריות, מספיק להראות ש- $(T - \lambda_{n+1})(v_{n+1}) \in W$, שכן זה מתקיים על כל בסיס אחר. אך זה ברור – עבור $[T]_B$ העמודה האחרונה היא:

$$\begin{pmatrix} \alpha_1 \\ \vdots \\ \alpha_n \\ \lambda_{n+1} \end{pmatrix}$$

ולכן:

$$T(v_{n+1}) = \alpha_1 v_1 + \dots + \alpha_n v_n + \lambda_{n+1} v_{n+1} \implies (T - \lambda_{n+1})(v_{n+1}) = \alpha_1 v_1 + \dots + \alpha_n v_n \in W$$

■

- נוכיח בעבור מטריצה משולשית/ניתנת לשילוש.

תת־הוכחה. אם A משולשית, אז $f_A(x) = f_{T_A}(x)$ כאשר $T_A: \mathbb{F}^n \rightarrow \mathbb{F}^n$ המוגדרת ע"י $T_A(v) = Av$, ואז T_A ניתנת לשילוש וסיימנו.

■

אם A ניתנת לשילוש, אז היא דומה למשולשית, והן בעלות אותו הפולינום האופייני. אז חזרה לתחילת ההוכחה.

- עבור T כללית או A כללית.

תת־הוכחה. נניח $A = [T]_B$ עבור בסיס B , וידוע $f_T(x) = f_A(x)$. ידוע ש- A ניתנת לשילוש אמ"מ $f_A(x)$ מתפצל. טענה מהעתידי הלא רחוק: לכל שדה \mathbb{F} קיים שדה $\mathbb{K} \subseteq \mathbb{F}$ סגור אלגברית (כל פולינום מעל שדה סגור אלגברית מתפצל). על כן, ניתן לחשוב על $A \in M_n(\mathbb{F})$ כמו $A \in M_n(\mathbb{K})$. הפולינום האופייני מעל K הוא אותו הפולינום האופייני מעל \mathbb{F} . לכן הוא מתפצל (מעל \mathbb{K}), ולכן הוא דומה למשולשית, ומהמקרה הראשון $f_A(A) = 0$. זאת כי $f_A(A)$ לא תלוי בשדה עליו אנו עובדים, וסה"כ הוכחנו בעבור מטריצה כללית, ולכן לכל ט"ל.

■

משפט 17. אם A מייצגת של העתקה T , ו- $f \in \mathbb{F}[x]$, אז $f(T) = 0 \iff f(A) = 0$.

הערה 7 (בנוגע לשדות סגורים אלגברית). הטענה שלכל שדה יש שדה סגור אלגברית – טענה שתלויה באקסיומת הבחירה. הסגור האלגברי הוא יחיד. **הטענה הזו לא נאמרת באופן רשמי בקורס** על אף שהרחבה לשדה סגור אלגברית מועילה מאוד בלינארית 2 באופן כללי.

המשך בעמוד הבא

3 Ring Theory

3.1 ~ מבוא והגדרות בסיסיות

אז, מה זה אובייקט אלגברי? הרעיון – "Data עם אקסיומות". אנו כבר מכירים רבים מהם: תמורות, חבורות, שדות, מרחבים וקטוריים, ועוד. עתה נכיר אובייקט אלגברי בשם חוג.

הגדרה 18. חוג עם יחידה הוא קבוצה עם שתי פעולות, כפל וחבור, ניטרלים לפעולות (0, 1) כך שמתקיימות כל אקסיומות השדה למעט (פוטנציאלית) קיום איבר הופכי, וקומוטטיביות הכפל.

אנחנו נתעניין ספציפית בחוגים קומוטטיבים, כלומר, בהם הכפל כן קומוטטיבי. המטריצות הריבועיות מעל אותו הגודל, לדוגמה, הוא חוג שאיננו קומוטטיבי. החוג ה"בסיסי ביותר" – חוג השלמים (אין הופכי) הוא חוג קומוטטיבי. ישנם חוגים בלי יחידה (לדוגמה הזוגיים בלי יחידה), שלא נדבר עליהם כלל.

הגדרה 19. תחום שלמות הוא חוג קומוטטיבי עם יחידה ללא מחלקי 0.

הגדרה 20. חוק ייקרא ללא מחלקי 0 אם: $\forall a, b \in \mathbb{R}: ab = 0 \implies a = 0 \vee b = 0$

דוגמאות לחוגים עם מחלקי 0:

• $M_2(\mathbb{R})$: הוכחה $a \cdot b = 0$, $a = b = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$

• $\mathbb{Z}/6\mathbb{Z}$ הוכחה $2 \cdot 3 = 0$

משפט 18. בתחום שלמות יש את כלל הצמצום בכפל: אם $ab = ac \wedge a \neq 0$ אז $b = c$.

הוכחה.

$$ab \cdot ac = 0 \implies a(b \cdot c) = 0 \implies a = 0 \vee b - c = 0$$

■

בגלל ש- $a \neq 0$, אז $b - c = 0$. נוסיף את c הנגדי של $-c$ ונקבל $b = c$.

דוגמאות לתחום שלמות:

- שדות
- השלמים
- חוג הפולינומים

3.2 ~ ראשוניות ואי-פריקות

הגדרה 21. יהי R תחום שלמות, $a, b \in R$. נאמר ש- $a \mid b$ אם קיים $c \in R$ כך ש- $ac = b$.

הגדרה 22. $u \in R$ נקרא הפיך אם קיים $\alpha \in R$ כך ש- $\alpha u = 1$.

משפט 19. יהי R תחום שלמות, $u \in R$ הפיך. יהי $a \in R$. אז $u \mid a$.

■

הוכחה. $1 \mid a$, $u \mid 1$. יחס החלוקה טרנזיטיבי ולכן $u \mid a$.

סימון 3. קבוצת ההפיכים מוסמנת ב- R^x .

דוגמאות.

1. אם $R = \mathbb{F}$, אז $\mathbb{F}^x = \mathbb{F} \setminus \{0\}$

2. אם $R = \mathbb{Z}$ אז $\mathbb{Z}^2 = \{\pm 1\}$

3. אם $R = \mathbb{F}[x]$ אז $R^x = \mathbb{F}^x$ (ההתייחסות לסקלרים היא כאל פונקציות קבועות)

הגדרה 23. $a, b \in R$ נקראים חברים אם קיים $u \in R^x$ הפיך כך ש- $a = ub$, ומסמנים $a \sim b$.

משפט 20. יחס החבורות הוא יחס שקילות.

הוכחה.

א. $a \sim a$ כי $1 \in R^x$

ב. אם $a \sim b$ אז קיים $u \in R^x$ כך ש- $a = ub$. קיים u הופכי α אז $\alpha a + \alpha ub = b$ ולכן $b \sim a$.

ג. נניח $a \sim b \wedge b \sim c$, כי מכפלת ההופכיים הפיכה $a \sim c$ וסיימנו.

■

"אני אני חבר של עומר, ועומר חבר של משהו בכיתה שאני לא מכיר, אני לא חבר של מי שאני לא מכיר." המרצה: "למה לא? תהיה חבר שלו".

משפט 21. הופכי הוא יחיד

(אותה ההוכחה כמו בשדות. לא בהכרח בתחום שלמות, מעל כל חוג)

הוכחה. יהי $a \in R^x$ ו- u, u' הופכיים שלו, אז:

$$u = u \cdot 1 = u \cdot a \cdot u' = 1 \cdot u' = u'$$

■

משפט 22. אם $a \mid b$ וכך $a \mid b$ אז $a \mid b$ (בתחום שלמות).

הוכחה.

$$a \mid b \implies \exists c \in R: ac = b$$

$$b \mid a \implies \exists d \in R: bd = a$$

לכן:

$$ac = b \implies acd = a \implies a(cd - 1) = 0 \implies a = 0 \vee cd = 1$$

■

אם $a = 0$ אז $b = 0$ (ממש לפי הגדרה) ו- \sim שקילות (רפליקסיביות). אחרת, $cd = 1$ ולכן c הפיך, סה"כ $a \mid b$.

"אני חושב שבעברית קראו להם ידידים, לא רצו להתחייב לחברות ממש".

הגדרה 24. איבר $p \in R$ נקרא אי-פריק אם מתקיים $a \in R^x \vee b \in R^x$ $p = ab \implies$

הגדרה 25. איבר $p \in R$ יקרא ראשוני אם $p \mid (a \cdot b) \implies p \mid a \vee p \mid b$

הערה 8. איברים הפיכים לא נחשבים אי-פריקים או ראשוניים. הסיבה להגדרה: בשביל נכונות המשפט היסודי של האריתמטיקה (יחידות הפירוק לראשוניים).

משפט 23. בתחום שלמות כל ראשוני הוא אי פריק.

הערה: שקילות לאו דווקא.

הוכחה. יהי $p \in R$ ראשוני. יהיו $a, b \in R$ כך ש- $p = ab$. בה"כ $p \mid a$. אז קיים c כך ש- $pc = a$ ולכן $pcb = p$. סה"כ $p \neq 0$ ולכן $cb = 1$ (ראה לעיל) ו- b הפיך.

■

הגדרה 26. R תחום פריקות יחידה אם $\prod_{i=1}^n p_i = \prod_{j=1}^m q_j$ עבור ראשוניים, אז $m = n$, ועד לכדי סידור מחדש, לכל $p_i \sim q_i \ i \in [n]$

משפט 24. נניח שבתחום שלמות R , כל אי-פריק הוא גם ראשוני. אז R תחום פריקות יחידה.

ההוכחה: זהה לחלוטין לזו של המשפט היסודי.

הוכחה. באינדוקציה על $n + m$. בסיס: $n + m = 2$ ולכן $n = m = 1$ (כי מעפלה ריקה לא רלוונטית מאוד) אז $p = q$. נעבור לצעד. נניח שהטענה נכונה לכל $n + m < k$. נניח ש- $n + m = k$. אז $p_1 \mid \prod_{j=1}^m q_j$. בה"כ $p_1 \mid q_1$. אי-פריק ולא הפיך. $p_1 \sim q_1$. לכן $p_1 \sim q_1$. אז עד כדי כפל בהופכי נקבל ש- $\prod_{i=2}^n p_i = \prod_{j=2}^m q_j$. הערה: ראשוני כפול הפיך נשאר ראשוני. מכאן הקענו לדרוש וסיימנו (הערה שלי: כאילו תכפילו בחברים ותקבלו את מה שצריך).

■

הגדרה 27. יהי R תחום שלמות. תת-קבוצה $0 \neq I \subseteq R$ נקראת אידיאל אם:

א. $\forall a, b \in I: a + b \in I$ - סגירות לחיבור.

ב. $\forall a \in I \forall b \in R: ab \in I$ - תכונת הבליעה. [בפרט $0 \in I$]

דוגמאות:

1. 0 תמיד אידיאל, וכן החוג כולו תמיד אידיאל.

2. הזוגיים ב- \mathbb{Z} .

3. לכל $n \in \mathbb{Z}$, $n\mathbb{Z}$ אידיאל (n כפול השלמים). הזוגיים לדוגמה, מקרה פרטי הוא $2\mathbb{Z}$.

4. $\langle f \rangle \subseteq \mathbb{F}[x]$ המוגדר לפי $\langle f \rangle := \{g \in \mathbb{F}[x] \mid f \mid g\}$

5. הכללה של הקודמים: עבור $a \in R$ נסמן $\langle a \rangle := \{a \cdot b \mid b \in R\}$ הוא אידיאל.

6. $I = \{f \in \mathbb{F}[x] \mid f(0) = 0\}$ (לעיתים מסומן $\langle a \rangle$) $(\forall a \in R: aR = \langle a \rangle)$

7. נוכל להכליל את 4 עוד: ("הכללה של הכללה היא הכללה. זה סגור להכללה. זה קורה הרבה במתמטיקה")

$$I = aR + bR = \{ar + bs \mid r, s \in R\}$$

וניתן להכליל עוד באינדוקציה.

הגדרה 28. אידיאל I נקרא ראשי אם הוא מהצורה aR עבור $a \in R$ כלשהו.

סימון 4. $Ra =: \langle a \rangle =: \{ar \mid r \in R\}$

הגדרה 29. תחום שלמות נקרא ראשי אם כל אידיאל שלו ראשי.

הערה 9. אנחנו סימנו אידיאל ב- aR ובקורס מסמנים Ra , באופן כללי אפשר לדבר על אידיאל שמאלי ואידיאל ימני. תזכורת: $I \subseteq R$ היא אידיאל אם היא סגורה לחיבור ומקיימת את תכונת הבליעה. בתחום ראשי כל אידיאל הוא אידיאל ראשי.

משפט 25. ב- $R \neq \{0\}$ תחום ראשי אז כל אי פריק הוא ראשוני.

(תנאי מספיק אך לא הכרחי)

הוכחה. יהי o אי פריק (א"פ). יהיו $a, b \in R$ כך ש- $ab = p$. תיקון [משבוע שעבר]: במקום $I = Ra + Rb$, נשתמש ב- $I = Ra + Rp$. בכלל ש- R תחום ראשי, קיים $c \in R$ כך ש- $I = Rc$ ו- $a, p \in I$ כלומר $a \mid c$ ו- $p \mid c$. א"פ ולכן $c \sim p$ או הפיך c .

• הפיך $c \in I \iff c = R \cdot 1 \in I \subseteq R \iff c \in R$ קיימים $r, s \in R$ כך ש- $ra + sp = 1$. נכפיל ב- b ונקבל $rab + spb = b$ וסה"כ $b \mid p$.

• אם $c \sim p$, אז $a \mid c$ ו- $p \mid c$ ולכן $p \mid a$.

■

מסקנה 6. אם R תחום שלמות ראשי אזי יש פריקות יחידה למכפלה של אי פריקים עד כדי חבורות.

משפט 26. יהיו $a, b \in R$, אז a, b ייקראו זרים אם $\forall c \in R: c \mid a \wedge c \mid b \implies c \in R^\times$

הגדרה 30. יהי $g \in R$ כך ש-:

$$1. \quad g \mid a \wedge g \mid b$$

$$2. \quad \forall \ell \in R: \ell \mid a \wedge \ell \mid b \implies \ell \mid g$$

$$3. \quad \ell \mid g$$

אז g כנ"ל הוא הגורם המשותף המקסימלי של a, b , הוא $\gcd(a, b)$

משפט 27. יהי R תחום שלמות ויהיו $a, b \in R$. נניח שקיימים $r, s \in R$ כך ש- $g = ra + sb$ אשר מחלק את a, b . אז:

$$1. \quad \gcd(a, b) = g$$

2. ה- \gcd מוגדר ביחידות עד לכדי חבורות.

3. בתחום ראשי, לכל a, b קיים g כנ"ל.

(הערה: רק 3 באמת דורש תחום ראשי)

הוכחה.

$$1. \quad \text{יהי } \ell \mid a, b \text{ אז } \ell \mid ra, sb \text{ וסה"כ } \ell \mid g$$

$$2. \quad \text{מ-1 (בערך) אם } g, g' \text{ מקיימים את היותם } \gcd \text{ אז } g \mid g' \text{ ולכן } g' \sim g$$

$$3. \quad \text{נסמן } I = Ra + Rb. \text{ אז } I = Rg \text{ וקיימים } r, s \in R \text{ כך ש-} ra + sb = g \text{ ולכן } a, b \in I \text{ וסיימנו מ-1.}$$

■

מסקנה 7. בתחום ראשי, אם a, b זרים אז $\exists r, s \in R: ra + sb = 1$ (אלגוריתם אוקלידס המורחב).

משפט 28. $\mathbb{F}[x]$ תחום ראשי.

הוכחה. יהי $I \subseteq \mathbb{F}[x]$ אידיאל. אם $I = \{0\}$, הוא ראשי. אחרת, $I \neq \{0\}$ ואז: יהי $0 \neq p \in I$ פולינום מדרגה מינימלית, ויהי $f \in I$. אז קיימים $q, r \in \mathbb{F}[x]$ כך ש- $f = qp + r$ ו- $\deg r < \deg p$. ידוע $\deg r < \deg p$. בגלל ש- $f \in I$ ו- $qp \in I$ אז $r \in I$. אם r אינו 0, קיבלנו סתירה למינימליות הדרגה של p .

■

הוכחה זהה עובדת בשביל להראות ש- \mathbb{Z} תחום ראשי, אך עם דרגה במקום ערך מוחלט.

הגדרה 31. תחום שלמות נקרא אוקלידי אם קיימת $N: R \setminus \{0\} \rightarrow \mathbb{N}_+$ כך ש- $a = ub + r$ עם $\forall a, b \in R \setminus \{0\}: \exists u, r \in R: a = ub + r$ כאשר $r \neq 0$ או $N(b) > N(r)$, ו- N סאב-כפליית כלומר $\forall 0 \neq a, b \in R: N(a) \leq N(ab)$.

ברגע שיש לנו את ההגדרה של תחום אוקלידי, N הפונקציה שתשתמש אותנו בשביל להראות את ההוכחה שכל תחום אוקלידי הוא תחום ראשי (בדומה לערך מוחלט או \deg בהוכחות קודמות). ההפך נכון תחת השערת רימן המוכללת (לא ראיתם את זה צץ, נכון?).

אינטואיציה לחוג אוקלידי היא "חלוקה עם שארית", כאשר פונקציה הגודל N דורשת שהשארית תהיה "אופטימלית". בחוג הפולינומים $N = \deg$ (פרטים בהמשך), ובחוג המספרים השלמים $N = |\cdot|$.

דוגמה לחוג שאינו אוקלידי: $\mathbb{Z}[\sqrt{-5}]$ הוא $\{a + b\sqrt{-5} \mid a, b \in \mathbb{Z}\}$.

משפט 29. חוג אוקלידי \iff פריקות יחידה (דומה למשפט היסודי של האריתמטיקה).

משפט 30. חוג אוקלידי \iff תחום שלמות.

(הוכחה בויקיפדיה)

לדוגמה בחוג לעיל $6 = 2 \cdot 3 = (1 + \sqrt{-5})(1 - \sqrt{-5})$ על אף ש-2, 3 אי-פריקים וכן $(1 - \sqrt{-5}), (1 + \sqrt{-5})$ אי פריקים.

דוגמה (חוג השלמות של גאוס).

$$R = \mathbb{Z}[i] = \{a + bi \mid a, b \in \mathbb{Z}\}$$

הנורמה:

$$N: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{Z}_{\geq 0}, N(a + bi) = a^2 + b^2 = |a + bi|^2$$

בדומה להוכחה לפיה הערך המוחלט של מורכב הוא כפלי, ניתן להראות ש- N כפלית. מי הם ההפכים ב- $\mathbb{Z}[i]$? מי שמקיים $\alpha\beta = 1$ כלומר:

$$N(\alpha)N(\beta) = 1 = N(1), \alpha = a + bi, a^2 + b^2 = 1 \implies a + bi = \pm 1, \pm i$$

בהנחה שמוגדרת נורמה כזו, החוג הוא אוקלידי (תנאי זה הכרחי אך לא מספיק).

משפט 31. יהי $p \in \mathbb{Z}$ ראשוני. התנאים הבאים שקולים:

- p פריק ב- $\mathbb{Z}[i]$
- $p = m^2 + n^2$ עבור $n, m \in \mathbb{Z}$
- $p \equiv 1 \pmod{4}$ או $p = 2$
- קיימים $r, s \in R$ כך ש- $ra + sb = 1$

שימו לב ש- \mathbb{Z} בתוך $\mathbb{Z}[i]$ לא סגורים לבליעה.

הגדרה 32. $I \subseteq R$ אידיאל נקרא ראשוני אם $\forall a, b \in R: (a \cdot b) \in I \implies (a) \in I \vee (b) \in I$.

הגדרה 33. אידיאל $I \subseteq R$ נקרא אי-פריק אם $\forall a, b \in R$ אם $I = (a \cdot b)$ אז $I = (a)$ או $I = (b)$.

ראינו, שבתחום ראשי אי פריק=ראשוני. ניתן להראות באופן שקול כי:

משפט 32. R תחום ראשי, אז I ראשוני אמ"מ I אי-פריק.

הגדרה 34. יהי R תחום שלמות [אפשר להתעסק גם עם אידיאל ימני ושמאלי] ונניח $I \subseteq R$ אידיאל. אז $R/I := \{a + I \mid a \in R\}$ הוא חוג (בהגדרת $a + I = \{a + i \mid i \in I\}$ חיבור מנות), כאשר הפעולות:

$$(a + I) + (b + I) = (a + b) + I$$

$$(a + I)(b + I) = ab + I$$

צריך להוכיח שזה לא תלוי בנציגים (הנציגים a, b) והכל אבל בן לא עומד לעשות את זה. נשאר כתרגיל בעבור הקורא.

3.3 \sim הרחבת שדות

משפט 33. בתחום ראשי R , אם I אידיאל אי-פריק, אז R/I שדה.

דוגמאות.

• שדה $\mathbb{Z}/\langle p \rangle$ שדה.

• $\mathbb{R}[x]$ תחום ראשי, ידוע $x^2 + 1$ אי-פריק. לכן $\mathbb{R}[x]/\langle x^2 + 1 \rangle \cong \mathbb{C}$. הרעיון: נוכל להסתכל על p פולינום המבוטא כמו:

$$p(x) = q(x) \cdot (x^2 + 1) + ax + b = ax + b + \langle x^2 + 1 \rangle$$

ואם נכפיל שני יצורים כאלו:

$$((ax + b) + I) + (cx + d + I) = acx^2 + (ad + bc)x + bd + I$$

אך ידוע ש- $x^2 + 1 = 0$ (כי זה האידיאל שלנו) עד לכדי נציג, כלומר מתקיים שוויון ל- $bd - ac + (ad + bc)x + I$ זהו כפל מרוכבים. אפשר גם להראות קיום הופכי וכו'.

הוכחה. יהי $a + I \in R/I$, $a \neq 0$. אם $a \neq 0$, אז ב- R מתקיים $p \nmid a$ אי-א"פ (אם הוא היה מחלק את a אז $a = 0$) ולכן p, a זרים (כי האידיאל אי פריק וכו'). אז קיימים $r, s \in R$ כך ש- $ar + ps = 1$ סה"כ:

$$ar + ps + I = 1 + I \implies ar + I = 1 + I \quad \top$$

לכן $r + I$ הופכי של $a + I$ וסיימנו. ■

(למעשה זה אמ"מ - הכיוון השני תרגיל בעבור הקורא).

הגדרה 35. יהי R תחום שלמות, $a_1 \dots a_n \in R$ ו- $\ell = \text{lcm}(a_1 \dots a_n)$ אמ"מ:

$$\forall i \in [n]: a_i \mid \ell \quad 1.$$

$$\forall b \in R: \forall i \in [n]: a_i \mid b \implies \ell \mid b \quad 2.$$

דוגמה. $R = \mathbb{Z}$, $\text{lcm}(2, 6, 5) = 30$.

משפט 34. יהי \mathbb{F} שדה ויהי $f \in \mathbb{F}[x]$ פולינום אי-פריק ממעלה $\deg f > 1$. אז קיים $\mathbb{K} \supseteq \mathbb{F}$ כך שב- \mathbb{K} יש ל- f שורש. ההוכחה למשפט קונסטרוקטיבית, ובה צריך להראות שהקבוצה:

$$\mathbb{K} = \{p(A_f) \mid p \in \mathbb{F}[x]\}$$

עם חיבור וכפל מטריצות, היא שדה. השיכון $\alpha \mapsto \alpha I$ משכן את $\mathbb{F} \mapsto \mathbb{K}$.

משפט 35. (ללא הוכחה בקורס, תלוי באקסיומת הבחירה) לכל שדה \mathbb{F} קיים יחיד שדה $\mathbb{K} \supseteq \mathbb{F}$ סגור אלגברית.

דוגמה: \mathbb{R} ו- \mathbb{C} .

3.4 \sim חוג הפולינומים

(תת-פרק זה לקוח מתרגול בקורס)

הגדרה 36. הזרקה של הפולינום היא $\deg(f) := \max\{n \in \mathbb{N} \mid a_n \neq 0\}$, ומגדירים $\deg(0) = -\infty$.

משפט 36.

$$\deg(fg) = \deg f + \deg g \quad \deg(d + g) = \max\{\deg f, \deg g\}$$

הערה 10. חוג הפולינומים הוא חוג אוקלידי כי פונקציית הגודל $N = \deg f$ מקיימת את התנאי של חוג אוקלידי. לכן ממשפט הוא תחום ראשי.

מסקנה 8. לכל $f, g \in \mathbb{F}[x]$, אם $g \neq 0$ אז קיימים יחידים פולינומים $q, r \in \mathbb{F}[x]$ כך ש- $f = qg + r$ ו- $\deg r < \deg g$.

הגדרה 37. נאמר שפולינום q מחלק את f אם $r = 0$ ומסמנים $q \mid f$.

מסקנה 9.

$$1. \quad f(a) = 0 \iff (x - a) \mid f \quad (\text{משפט בזו})$$

$$2. \quad \text{אם } \deg f = n > -\infty, \text{ לכל היותר } n \text{ שורשים כולל ריבוי.}$$

$$3. \quad \text{נניח ש-} f, g \in \mathbb{F}[x], \mathbb{F} \subseteq \mathbb{K} \text{ כאשר } K \text{ שדה. אם } g \mid f \text{ מעל } K \text{ אז } g \mid f \text{ מעל } \mathbb{F}.$$

הוכחה.

1. הוכחה למשפט בזו:

$$\implies \text{נניח } (x - a) \mid f. \text{ אז קיים פולינום } g \text{ כך ש-} f = (x - a)g, \text{ קרי } f(a) = (a - a)g(a) = 0.$$

$$\Leftarrow \text{נניח } f(a) = 0. \text{ אז קיימים } q, r \in \mathbb{F}[x] \text{ כך ש-} f = q(x - a) + r(a) = 0 \text{ ועל כן } 0 = f(a) = q(a)(a - a) + r(a) = r(a). \text{ משום ש-} r \text{ פולינום קבוע (דרגתו קטנה מ-1, כי חילקנו ב-} (x - a) \text{ מדרגה 1), אז } r(x) = 0.$$

2. אינדוקציה

3. נוכיח ב-"contrapositive": $P \rightarrow Q \iff \neg Q \rightarrow \neg P$ אנו יודעים ש- $\neg Q \rightarrow \neg P$ נניח ש- $g \nmid f$ מעל \mathbb{F} . קיימים $q, r \in \mathbb{F}[x]$ כך ש- $f = qg + r$, $r \neq 0$. הפירוק הזה הוא גם ב- $\mathbb{K}[x]$. מיחידות r , נקבל ש- $g \nmid f$ כל מעל K .

■

"לא הנחתי בשלילה, הוכחתי בקונטראפוזיטיב"

משפט 37. בהינתן $f \in \mathbb{F}[x]$ ו- $\lambda \in \mathbb{F}$, אז $r \in \mathbb{N}$ יקרא שורש מריבוי r של f אם $f \mid (x - \lambda)^r$ ו- $f \nmid (x - \lambda)^{r+1}$.

משפט 38.

$$\forall f \in \mathbb{F}[x]: f(\lambda) = 0 \implies \exists g \in \mathbb{F}[x]: f(x) = (x - \lambda)g(x)$$

משפט 39. (באינדוקציה על הסענה הקודמת) בהינתן \mathbb{F} שדה סגור אלגברית:

$$\forall f \in \mathbb{F}[x]: \exists (\alpha_i)_{i=1}^n \in \mathbb{F}, a_n \in \mathbb{F}: a_n \cdot f = \prod_{i=1}^n (x - \alpha_i)$$

משפט 40. (מסקנה מהסענה הקודמת שניתן להוכיח באינדוקציה ללא הרחבת שדות) לפולינום $f \in \mathbb{F}[x]$ שאינו אפס יש לכל היותר $\deg f$ שורשים.

הערה 11. שימו לב! כל המסקנות שלנו על תחומים ראשיים תקפים גם על פולינומים. בפרט, ניתן לכתוב כל פולינום $\mathbb{F}[x]$ כמכפלה של גורמים אי-פריקים ב- $\mathbb{F}[x]$ (אם \mathbb{F} סגור אלברית, אלו גורמים לינאריים) עד לכדי סדר וחברות (קבועים).

הערה 12. שימו לב שחלק ניכר מהמשפטים לעיל נכונים בעבור פולינומים מעל שדה ולא מעל כל חוג (בפרט, המשפט לפיו חוג הפולינומים תחום אוקלידי).

עתה נציג משפט פשוט אך מועיל ממתמטיקה B, שלעיתים משמש לניחוש שורשי פולינום ע"מ לפרקו.

משפט 41. יהי $p = \sum_{i=1}^n \alpha_i x_i \in \mathbb{Z}[x]$ פולינום עם מקדמים שלמים. יהי $\frac{a}{b} \in \mathbb{Q}$ כך ש- $p(\frac{a}{b}) = 0$ שורש, ובה"כ $\gcd(a, b) = 1$ (אחרת ניתן לצמצם). אזי $a \mid \alpha_0 \wedge b \mid \alpha_n$.

מסקנה 10. $\forall A \in M_n(\mathbb{F}) \forall k \geq n \exists p(c) \in \mathbb{F}_{n-1}[x]: A^k = p(A)$

מסקנה זו נובעת מאלגוריתם לביטוי A^{n+c} כקומבינציה לינארית של $A \dots A^{n-1}$ שמופיע בסוף הסיכום.

3.4.1 פונקציות רציונליות ומספרים אלגבריים

אינטואיציה: הרעיון של פונקציה רציונלית היא להיות "פולינום חלקי פולינום". נפרמל את הדבר הזה בעבור מרחב פולינומים מעל כל שדה.

משפט 42. בהינתן \mathbb{F} שדה הקבוצה $\{(f, g) \mid f, g \in \mathbb{F}[x], g \neq 0\}$ משרה את יחס השקילות הבא:

$$(f, g) \sim (\tilde{f}, \tilde{g}) \iff f \cdot \tilde{g} = \tilde{f} \cdot g$$

סימון 5. נסמן כל איבר במחלקת השקילות ע"י $\frac{f}{g}$ שמייצגים אותו.

הגדרה 38. שדה הפונקציות הרציונליות הוא הקבוצה $Q[x]$ היא אוסף מחלקות השקילות של \sim מהמשפט הקודם, עם פעולות החיבור והכפל הבאות:

$$\frac{f}{g} \cdot \frac{\tilde{f}}{\tilde{g}} = \frac{f\tilde{f}}{g\tilde{g}} \wedge \frac{f}{g} + \frac{\tilde{f}}{\tilde{g}} = \frac{f\tilde{g} + g\tilde{f}}{g\tilde{g}}$$

למה 1. הגדרות הפעולות לעיל מוגדרות היטב (כלומר הן לא תלויות בנציגים)

משפט 43. $Q[x]$ שדה, כאשר $\frac{0}{1}$ הניטרלי לחיבור ו- $\frac{1}{1}$ הניטרלי לכפל.

המלצה. לקרוא שוב את פרק 2.1, "על ההבדל בין פולינום לפולינום", בו נבחין שלמרות ש- $|\mathbb{F}_2 \rightarrow \mathbb{F}_2| = 4$, ישנם אינסוף פולינומים מעל השדה הזה.

אינטואיציה. למעשה, נרצה להגיד שדה הפונקציות הרציונליות הוא איזומורפית (קאנונית, ולכן נתייחס אליו כאילו הוא שווה) ל-:

$$Q[x] \cong \left\{ \frac{f(x)}{g(x)} \mid f(x), \underbrace{g(x)}_{\neq 0} \in \mathbb{F}[x] \right\}$$

כאשר $\mathbb{F}[x]$ חוג הפולינומים מעל השדה \mathbb{F} . עוד כדאי לציין ש- $Q[x]$ מכיל עותק של $\mathbb{F}[x]$ (עד לכדי איזומורפיזם) בעבור $g = 1$ פולינום היחידה. כמובן ש"איזומורפיזם" בהקשר הזה מדבר על העתקה (לא בהכרח לינארית) שמשמרת את פעולות החוג.

משפט 44. לכל p ראשוני $x^p = x$ $\forall x \in \mathbb{F}_p$.

הערה 13. זוהי מסקנה ישירה מהמשפט הקטן של פרמה.

הגדרה 39. מספר מרוכב $\alpha \in \mathbb{C}$ יקרא מספר אלגברי אם קיים פולינום $f \in \mathbb{Q}[x]$ כד $f(\alpha) = 0$.

הגדרה 40. מספר מרוכב שאינו אלגברי יקרא מספר טרנסצנדנטי.

דוגמאות. נבחין ש- $\sqrt{\alpha}$ הוא אלגברי כי הוא שורש של $x^2 - \alpha$. קיימות הוכחות לפיהן e ו- π הם מספרים טרנסצנדנטיים.

משפט 45. בהניח $V \subseteq \mathbb{C}$ תמ"ו מעל \mathbb{C} , אם $xV \subseteq V$ אז x אלגברי.

הוכחה. נגדיר $T_x: V \rightarrow V$ כך ש- $T_x(v) = xv$ (ההעתקה מוגדרת היטב מהנתון). אזי $f_T(T) = 0$.

$$f_T(t) = \sum_{i=1}^n a_i t^i \implies 0_V = f(T)v = \sum_{i=1}^n a_i T^i v = \left(\sum_{i=1}^n a_i x^i \right) v = f(x)v$$

בפרט עבור $v \in V \setminus \{0\}$ יתקיים $f(x) = 0$ ולכן x אלגברי.

■

המשך בעמוד הבא

Primary Decomposition 4

4.1 ~ מרחבים T -שמורים וציקליים

הגדרה 4.1. נניח V מ"ו מעל \mathbb{F} , ו- $T: V \rightarrow V$ ט"ל. אז $U \subseteq V$ תמ"ו נקרא T -אינווריאנטי/שמורה אם לכל $u \in U$ מתקיים $T(u) \in U$.

דוגמאות. $V, \{0\}$ הם T -אינווריאנטים. גם המ"ע (המרחבים העצמיים) הם T -אינווריאנטי.

הערה 14. שימו לב: אם $U \subseteq V$ תמ"ו אינווריאנטי, אז $T|_U: U \rightarrow U$ ט"ל.

הערה 15. נניח $u_1 \dots u_k$ בסיס ל- U כנ"ל, ו- $W \subseteq V$ תמ"ו כך ש- $U \oplus W = V$, ונגיד ש- $w_{k+1} \dots w_n$ בסיס ל- W , אז $B = (u_1 \dots u_k, w_{k+1} \dots w_n)$ מקיים:

$$[T]_B = \begin{pmatrix} [T|_U] & A \\ 0 & B \end{pmatrix}$$

(כאשר $[T|_U] \in M_k$ ו- $B \in M_{n-k}$). ותחת ההנחה שאכן T הוא T -אינווריאנטי ו- W -אינווריאנטי, אפשר לייצג אותו באמצעות שתי מטריצות מייצגות על האלכסון (ראה הוכחת המשפט הבא)

משפט 4.6. יהי V מ"ו, U, W תמ"וים ונניח $U \oplus W = V$ וגם U, W הם T -אינווריאנטיים. אז $p_T(x) = p_{T|_U}(x) \cdot p_{T|_W}(x)$

הוכחה. משום ש- $U \oplus W = V$ קיים בסיס $B = (u_1 \dots u_k, w_{k+1} \dots w_n)$ כך ש- $u_1 \dots u_k$ בסיס ל- U ו- $w_{k+1} \dots w_n$ בסיס ל- W . נבחין, שבייצוג תחת הבסיס הזה:

$$[T]_B = \begin{pmatrix} [T|_U]_B & 0_{n \times (n-k)} \\ 0_{(n-k) \times n} & [T|_W]_B \end{pmatrix}$$

זאת כי לכל $v \in V$ ניתן לייצגו בצורה יחידה כסכום של $u \in U, w \in W$ כך ש- $v = u + w$, כלומר $Tv = Tu + Tw$. ואכן תחת העתקת הקורדינאטות מהגדרת כפל וקטור במטריצה הטענה לעיל מתקיימת. כלומר:

$$p_T(x) = \begin{vmatrix} Ix - [T|_U]_B & 0 \\ 0 & Ix - [T|_W]_B \end{vmatrix} = |Ix - [T|_U]_B| \cdot |Ix - [T|_W]_B| = p_{T|_U}(x) \cdot p_{T|_W}(x)$$

כדרוש. ■

משפט 4.7. בהינתן $U_1 \dots U_k$ מרחבים T -אינווריאנטיים כך ש- $\bigoplus_{i=1}^k U_i = V$, מתקיים $p_T(x) = \prod_{i=1}^k p_{T|_{U_i}}(x)$

הוכחה. באינדוקציה על המשפט הקודם. ■

הגדרה 4.2. יהי V מ"ו מעל \mathbb{F} , $T: V \rightarrow V$ ט"ל ו- $v \in V$ וקטור. אז תת-המרחב הציקלי הנוצר מ- T ע"י T הוא

$$\mathcal{Z}(T, v) := \text{span}\{T^k(v) \mid k \in \mathbb{N}_0\}$$

משפט 4.8

• $\mathcal{Z}(T, v)$ תמ"ו של V - טריויאלי.

• $\mathcal{Z}(T, v)$ תמ"ו T -אינווריאנטי - טריויאלי גם.

עתה נציג משהו נחמד. אם V נוצר סופית, גם $\mathcal{Z}(T, v)$ נ"ס. נגיד שיהיה $k \in \mathbb{N}_0$ מינימלי, כך שמתקיים $\mathcal{Z}(T, v) = \text{span}\{v, Tv, \dots, T^{k-1}v\}$. אז $T^k v \in \mathcal{Z}(T, v)$. לכן קיימים $a_0 \dots a_{k-1}$ כך ש- $a_0 v + a_1 Tv + \dots + a_{k-1} T^{k-1}v = 0$. ניתן לקחת כבסיס את $v, Tv, \dots, T^{k-1}v$ של $\mathcal{Z}(T, v)$. אז:

$$[T]_B = \begin{pmatrix} 0 & 0 & \dots & 0 & -a_0 \\ 1 & 0 & \dots & 0 & -a_1 \\ 0 & 1 & \vdots & 0 & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 1 & -a_{n-1} \end{pmatrix}$$

כאשר השורה האחרונה כזו:

$$T(T^{n-1}v) = -\sum_{k=0}^{n-1} a_k T^k v$$

הגדרה 4.3. $A_f = [T]_B$ היא המטריצה המצורפת לפולינום $f(x) = x^n + a_{n-1}x^{n-1} + \dots + a_0$

4.2 הפולינום המינימלי

דיברנו על הפולינום האופייני $f_A = f_T = \det(Ix - A)$. עוד ציינו בהינתן מטריצה, המטריצה המצורפת A_f מקיימת $f_{A_f} = f(x)$.

משפט 4.9. תהי $A \in M_n(\mathbb{F})$, נביט בקבוצה $I_A = \{p \in \mathbb{F}[x] : p(A) = 0\}$, אז $I_A \subseteq \mathbb{F}[x]$ אידיאל, קיים ויחיד I_A -פולינום מתוקן בעל דרגה מינימלית.

הגדרה 4.4. I_A לעיל יקרא הפולינום המינימלי.

הוכחה. נבחין כי $0 \in I_A$. סגירות לחיבור - ברור. תכונת הבליעה - גם ברור. סה"כ אידיאל. $\mathbb{F}[x]$ תחום שלמות ולכן נוצר ע"י פולינום יחיד $I_A = (p)$. אם $I_A = (p)$ אז $p \sim p'$ אם נקבע אותו להיות מתוקן אז הוא יחיד (חברות בשדה הפולינומים נבדלת ע"י כפל בפולינום קבוע). לפולינום הנ"ל נקרא הפולינום המינימלי של A הוא m_A . באותו האופן, עבור $T: V \rightarrow V$ ט"ל ניתן להגדיר את M_T .

סימון 4.6. m_A יהיה הפולינום המינימלי של המטריצה A .

הערה 4.16. אם $A \in M_n(\mathbb{F})$ ו- $p \in \mathbb{F}[x]$ כך ש- $p(A) = 0$, אז $p \in I_A$ ומתקיים $m_A \mid p$.

הערה 4.17. אנו יודעים ש- $f_A \mid m_A$ כי ממשפט קיילי המילטון $f_A(A) = m_A(A) = 0$, ו- $f_A \in I_A$ כאשר I_A האידיאל של המאפסים של A . מהיות מרחב הפולינומים תחום שלמות, $m_A \mid f_A$ כדרוש.

דוגמה. עבור $A = I_n$ אז $f_A = (x-1)^n$ ו- $m_A = (x-1)$ לא בהכרח $m_A = f_A$, אל לפעמים כן - לדוגמה בעבור $D: \mathbb{F}[x] \rightarrow \mathbb{F}[x]$ אופרטור הגזירה מתקיים $f_D = x^{n+1}$ וכן $m_D = x^{n+1}$ כי יש פולינומים שנדרש לכאור n פעמים ע"מ לקבל 0 , לדוגמה x^n .

משפט 4.50. תהא $A = A_f$ המטריצה המצורפת ל- A . אז $f_A = m_A$.

משפט 4.51. אם A מייצגת את $T: V \rightarrow V$ אז $m_A = m_T$ (כלומר, הפולינום המינימלי לא תלוי בבחירת בסיס).

הוכחה. נבחר בסיס ל- V, B . יהי $p \in \mathbb{F}[x]$. אז $p([T]_B) = [p(T)]_B$. שני האגפים מתאפסים ביחד, ולכן $I_A = I_T$.

הערה 4.18. נניח ש- A לכסינה והע"ע השונים הם $\lambda_1 \dots \lambda_k$ (כלומר $f_A = \prod_{i=1}^k (x - \lambda_i)^{r_i}$ אז $m_A = \prod_{i=1}^k (x - \lambda_i)$).

הוכחה. בה"כ A אלכסונית, $A = \text{diag}(\lambda_1 \dots \lambda_k)$ עם חזרות. נבחין ש- $\prod_{i=1}^k (x - \lambda_i) = 0$ (הסברים בהמשך). מייצגת העתקה $T: V \rightarrow V$ יש בסיס של ו"עים $B = (v_1 \dots v_n)$. אז $(\prod_{i=1}^k (T - \lambda_i))(v_j) = 0$ כי v_j מתאים ל- λ_i כלשהו וכך זה מתאפס. ידוע $m_A \mid \prod_{i=1}^k (x - \lambda_i)$. אם נוריד את אחד המכופלים אז הע"ע שירד לא יתאפס/לא יאפס את הוקטור העצמי המצאים, כלומר כל הגורמים הלינארים דרושים כדי לאפס את T , ומכאן המינימליות והשוויון ל- m_A .

הערה 4.19. אם $A \in M_n(\mathbb{F})$, ו- $\mathbb{F} \subseteq \mathbb{K}$, אז ניתן לחשוב על $A \in M_n(\mathbb{K})$ ו- m_A לא משתנה ללא תלות בשדה.

משפט 4.52. אם $g, h \in \mathbb{F}[x]$ ו- $T: V \rightarrow V$ ט"ל אז $g(T), h(T)$ מתחלפות.

הוכחה.

$$(g(T) \circ h(T))(v) = (g \cdot h)(T)(v) = (h \cdot g)(T)(v) = (h(T) \circ g(T))(v)$$

למה 2 (למת המחלק של פולינום מינימלי). יהי m_T הפולינום המינימלי של ט"ל $T: V \rightarrow V$. אם $f(x) \mid m_T(x)$ וגם $\deg f > 0$ אז $f(T)$ אינו הפיך.

הוכחה. בכלל ש- $m_T \mid f$ אז קיים $g \in \mathbb{F}[x]$ כך ש- $f \cdot g = m_T$. נניח בשלילה ש- $f(T)$ הפיכה. אז:

$$f(T) \circ g(T) = \underbrace{m_T(T)}_0 \implies \underbrace{f(T)^{-1} \circ (0)}_0 = g(T)$$

ידוע:

$$\deg m_T = \underbrace{\deg f + \deg g}_{>0} \implies \deg g < \deg m_T$$

בה"כ g מתוקן וקיבלנו סתירה למינימליות של m_T , אלא אם כן $g(x)$ פולינום ה-0 אבל אז $m_T = 0$ בסתירה להגדרתו של פולינום מינימלי.

הוכחה זהה עבור מחלק של m_A , עבור A מטריצה.

משפט 53. אם λ ע"ע של T אז בהינתן $p(T) = 0$ מתקיים $p(\lambda) = 0$.

הוכחה. קיים $v \neq 0$ ו"ע כלומר $Tv = \lambda v$, ולכן:

$$p(x) = \sum_{i=0}^n a_i x^i \quad 0 = 0v = p(T)(v) = \left(\sum_{i=0}^n a_i T^i \right) (v) = \sum_{i=0}^n a_i T^i(v) = \left(\sum_{i=0}^n a_i \lambda^i \right) v = p(\lambda)v$$

מהיות $v \neq 0$ נקבל $p(\lambda) = 0$ כדרוש.

"זה טבעוני, זה טבעוני וזה ממששש טבעוני." "מה זה אומר שזה לא טבעוני? יש בזה קצת ביצה".

משפט 54. λ ע"ע של T אם"מ $m_T(\lambda) = 0$.

הוכחה. כיוון אחד הוא מקרה פרטי של המשפט הקודם. מהכיוון השני, ידוע $m_T(\lambda) = 0$. לפי משפט בזו $(x - \lambda) | m_T(x)$. ידוע $m_T | f_T$ וסה"כ $(x - \lambda) | f_T$ וסה"כ λ ע"ע של T .

משפט 55. $m_A(x) \mid f_A(x) \mid (m_A(x))^n$

הוכחה. נותר להוכיח $f_A(x) \mid (m_A(x))^n$ (השאר ממשפטים קודמים). ידוע שפולינום מינימלי/אופייני נשארים זהים מעל כל שדה שמכיל את \mathbb{F} . לכן, ניתן להניח שהוא מתפרק לגורמים לינאריים. ראינו שאם $\mathbb{F} \subseteq \mathbb{K}, f, g \in \mathbb{F}[x]$ ומתקיים $f \mid g$ מעל \mathbb{F} , אז $f \mid g$ מעל \mathbb{K} .

$$\left(\sum n_i = n \right) \quad f_A = \prod_{i=1}^k (x - \lambda_i)^{n_i}, \quad m_A(x) = \prod_{i=1}^k (x - \lambda_i)^{m_i} \quad (1 \leq m_i \leq n_i) \quad (m_A(x))^n = \prod_{i=1}^k (x - \lambda_i)^{n|m_i}$$

בגלל ש- $n \leq m_i \cdot n \implies 1 \leq m_i$ אז מצאנו $f_A \mid m_A^n$.

הוכחה זהה עבור $T: V \rightarrow V$ עם $\dim V = n$.

מסקנה 11 (שימושית!). נניח ש- $f_A \mid g$. נניח ש- g אי פריק. אז $g \mid m_A$.

הוכחה.

$$g \mid f_A \mid (m_A)^n$$

ידוע g אי פריק, ולכן ראשוני (כי $\mathbb{F}[x]$ תחום ראשי) ולכן $g \mid m_A$.

משפט 56. נניח ש- A בלוקים עם בלוקים על האלכסון, $A = \text{diag}(A_1 \dots A_k)$ כך ש- $\sum n_i = n$, $\forall i \in [k]: A_i \in M_{n_i}(\mathbb{F})$, אז מתקיים $m_A = \text{lcm}(m_{A_1} \dots m_{A_k})$.

במקרה שלנו, ה- lcm הנ"ל הוא הפולינום בעל הדרגה המינימלית שמתחלק בכל ה- $m_{A_i}(x)$. באופן כללי, $\text{lcm}(m_{a_1} \dots m_{a_n})$ מתקבל כיוצר של אידיאל החיתוך בתחום הראשי. כלומר:

$$I = (\text{lcm}(A_1 \dots A_k)) = \bigcap_{i=1}^n Rm_{a_i}$$

(הבהרת הסימונים: $\langle a \rangle = (a) = Ra$).

הוכחה (למשפט לעיל). לכל $g \in \mathbb{F}[x]$ מתקיים:

$$g(A) = \begin{pmatrix} g(A_1) & & \\ & \ddots & \\ & & g(A_k) \end{pmatrix}$$

בבירור מתקיים $g(A) = 0$ אם"מ $g(A_i) = 0 \quad \forall i \in [k]$. לכן $m_{A_i} \mid g \quad \forall i \in [k]$. מהגדרת ה- lcm סיימנו.

מסקנה 12. תהי $T: V \rightarrow V$ ו- V מו"ס, אז בהינתן $U_1 \dots U_k$ מרחבים T -שמורים כך ש- $V = \bigoplus_{i=1}^k U_i$, אז $m_T = \text{lcm}(\{m_{T|_{U_i}} : i \in [k]\})$.

משפט 57. נניח ש- $T, S: V \rightarrow V$ ט"לים. אז:

1. אם S, T מתחלפות, אז $\text{Im } S, \ker S$ הם T -אינווריאנטים (ולהפך).

2. אם S, T מתחלפות ו- $S \subseteq W$ תמ"ו הוא T -אינווריאנטי, אז גם $S(W)$ הוא T -אינווריאנטי.

3. אם $W_1, W_2 \subseteq V$ הם T -אינוואריאנטים אז גם $W_1 + W_2$, $W_1 \cap W_2$ הם T -אינוואריאנטים.

4. אם $f \in \mathbb{F}[x]$ ו- $W \subseteq V$ תמ"ו T -אינוואריאנטים, אז גם $f(T)W$ הוא T -אינוואריאנטים.

הוכחה.

1. יהא $v \in \text{Im } S$, אז קיים $u \in V$ כך ש- $S(u) = v$:

$$Tv = T(S(u)) = (T \circ S)(u) = (S \circ T)(u) = S(T(u)) \in \text{Im } S \implies Tv \in \text{Im } S$$

ועבור $v \in \ker S$:

$$S(T(v)) = (ST)v = (TS)v = T(S(v)) = T(0) = 0 \implies Tv \in \ker S$$

2. יהי $v \in S(W)$. קיים $w \in W$ כך ש- $v = S(w)$:

$$Tv = T(S(w)) = S(T(w)) \in S(W)$$

כי $Tw \in W$.

3. ראינו בתרגול הקודם

4. יהי $w \in W$.

$$f = \sum_{i=1}^n a_i x^i, \quad f(T)w = \left(\sum_{i=0}^n a_i T^i \right)(w) = \sum_{i=0}^n a_i T^i(w)$$

■

באינדוקציה $T^i(w) \in W$ תמ"ו ולכן סגור וסיימנו.

4.3 ~ ניסוח והוכחת משפט הפירוק הפרימרי

משפט 58 (מקרה הבסיס של משפט הפירוק הפרימרי). ("מאוד חשוב") יהי V מ"ו מעל \mathbb{F} . נניח $T: V \rightarrow V$ ט"ל. נניח $f(T) = 0$. נניח ש- $f = g \cdot h$ עבור $\gcd(g, h) = 1$. אז:

$$V = \ker g(T) \oplus \ker h(T)$$

ואם $f = m_T$, אז g, h הם הפולינומים המינימליים לצמצום T על תת-המרחבים לעיל בהתאמה.

הבהרת הכוונה "פולינום המינימלי לצמצום T על תתי המרחבים": בהינתן $T = U \oplus W$, $T_U = T|_U: U \rightarrow U$ ובאופן דומה $T_W = T|_W: W \rightarrow W$, אז $m_T = m_{T_U} \cdot m_{T_W}$.

הוכחה.

• ידוע $h = g \cdot h$ ולכן $\exists a(x), b(x) \in \mathbb{F}[x]$ כך ש- $a(x)g(x) + b(x)h(x) = 1$ כך ש-:

$$\underbrace{(a(T) \circ g(T))(v)}_{\in \ker h(T)} + \underbrace{(b(T) \circ h(T))(v)}_{\in \ker g(T)} = V$$

הטענה ש- $(aT \circ gT)v \in \ker hT$ נובעת מכך ש-:

$$(hT)((aT \circ gT)v) = hT((ag(T))v) = (hag)Tv = ((agh)T)v = ((af)T)v = (aT)(fT)v = (a(T) \cdot 0)v = 0v = 0$$

(זאת כי כפל פולינומים קוממטיבי, כל עולמות הדיון אסוציאטיביים, וכאשר ההעתקה aT תקבל את $fT = 0$ היא תחזיר אפס וסה"כ $0v = 0$ כדרוש). מהכיוון השני:

$$(gT)((bT \circ hT)v) = gT((bh(T))v) = (gbh)Tv = ((bgh)T)v = ((bf)T)v = (bT)(fT)v = (b(T) \cdot 0)v = 0v = 0$$

כלומר אכן $(aT \circ gT) \subseteq \ker hT$ ו- $(bT \circ hT) \subseteq \ker gT$. מהשוויון לעיל סה"כ אכן $V = \ker h(T) + \ker g(T)$. הסכום אכן ישר שכן:

$$\forall v \in \ker gT \cap \ker hT: 0 + 0 = (aT \circ gT)v + (bT \circ hT)v = v$$

דהיינו, $\ker g(T) \oplus \ker h(T) = V$ כדרוש מהחלק הראשון של המשפט.

- עתה נוכיח את החלק השני של המשפט. נניח $f = m_T$, ונסמן:

$$\begin{aligned} W_2 &= \ker h(T) & W_1 &= \ker g(T) \\ T_2 &= T|_{W_2} & T_1 &= T|_{W_1} \end{aligned}$$

וכן B_1 בסיס ל- W_1 , B_2 ל- W_2 . לכן $B = B_1 \cup B_2$ בסיס ל- V . משום שהראינו ש- W_1, W_2 הם T -אינוואריאנטי (כי gT, hT מתחלפות):

$$[T]_B = \begin{pmatrix} [T_1] & 0 \\ 0 & [T_2] \end{pmatrix}$$

מהמשפט שראינו, $m_T = \text{lcm}(m_{T_1}, m_{T_2})$. ברור ש- $m_{T_1} | g$ וגם $m_{T_2} | h$. אז:

$$\deg m_{T_1} = \deg g + \deg h \geq \deg m_{T_1} + \deg m_{T_2} = \deg(m_{T_1} \cdot m_{T_2}) \geq \deg(\text{lcm}(m_{T_1}, m_{T_2})) = \deg m_T$$

ולכן כל ה"אשים לעיל הדוקים ושוויון בכל מקום.

$$\deg m_{T_1} \leq \deg g \wedge \deg m_{T_2} \leq \deg h$$

אם אחד מהשוויונות לא הדוקים, אז:

$$\deg m_{T_1} + \deg m_{T_2} < \deg g + \deg h$$

וסתירה למה שהראינו. לכן:

$$(m_{T_1} | g \wedge \deg m_{T_1} = \deg g) \implies m_{T_1} \sim g$$

אבל שניהם מתוקנים ולכן שווים. כנ"ל עבור h . $m_{T_2} = h$.

סה"כ הוכחנו את כל חלקי המשפט, כדרוש. ■

דוגמה. נסמן $f(x) = x^2(x-1)^3$, $f(T) = 0$. החלק הראשון של המשפט אומר $V = \ker T^2 \oplus \ker(T-I)^3$. החלק השני אומר שאם $f = m_T$ אז x^2 הוא הפולינום המינימלי של $T|_{\ker T^2}$ וכן $(x-1)^3$ המינימלי של $T|_{\ker(T-I)^3}$.

משפט 59 (משפט הפירוק הפרימרי). יהיו $T: V \rightarrow V$, הפולינום המינימלי של T , ונניח ש-:

$$m_T = g_1 \cdots g_s \quad \forall i \neq j: \gcd(g_i, g_j) = 1$$

אז:

$$V = \bigoplus_{i=1}^s \ker g_i(T)$$

ובנוסף g_i הוא הפולינום המינימלי של $T|_{\ker g_i(T)}$.

"יש לו שם מופצץ אז הוא כנראה חשוב"

הוכחה. באינדוקציה על s .

- **בסיס:** עבור $s = 2$ המשפט שהוכחנו.

- **צעד:** נסמן:

$$h(x) = g_s(x), \quad g(x) = \prod_{i=1}^{s-1} g_i(x)$$

ואז:

$$\forall i \neq j: \gcd(g_i, g_j) = 1 \implies \gcd(g, h) = 1$$

מהמשפט שקיבלנו:

$$V = \ker g(T) \oplus \ker h(T) \xrightarrow{\cong} \bigoplus_{i=1}^s \ker g_i(T)$$

וכדי להוכיח את החלק השני של המשפט, נגדיר $m_{T|_{\ker g_i}} = g_i$

$$\ker h(T) = \bigoplus_{i=1}^s \ker g_i(T|_{\ker h(T)}) = \bigoplus_{i=1}^s \ker g_i(T)$$

■

הערה 20. בהתאם למקרה הבסיס, מספיק היה להניח $f = g_1 \cdots g_s$, ולא היה באמת צורך להניח $f = m_T$ ספציפית, אם רק רוצים להראות קיום פירוק (ולא צריך להראות להראות ש- g_i הם הפולינומים המינימליים לצמצום T על התמ"ים). למעשה נשתמש בגרסה מוחלשת זו של משפט הפירוק הפרימרי.

משפט 60 (תוצאה 1 ממשפט הפירוק הפרימרי). T לכסינה אמ"מ $m_T = \prod_{i=1}^s (x - \lambda_i)$ מתפרק לגורמים לינאריים $i \neq j \Rightarrow \lambda_i \neq \lambda_j$ שונים זה מזה.

הוכחה.

\Rightarrow לפי המשפט, אם נסמן $g_i = (x - \lambda_i)$:

$$V = \bigoplus_{i=1}^s \ker(T - \lambda_i I)$$

כלומר V סכום ישר של המ"ע של $\lambda_1 \dots \lambda_s$. לכל מרחב עצמי מממד k_i קיימים $v_1 \dots v_{k_i}$ בסיס כך ש- $Tv_j = \lambda_i v_j$ ($j \in [k_i]$), ומהסכום הישר ידוע $\sum_{i=1}^s k_i = n$ ומהיות איחוד בסיסים של מ"ע גם בסיס (כי המ"ע זרים) מצאנו בסיס מלכסן הוא אוסף הבסיסים של המ"עים.

\Leftarrow אם T לכסינה, אז הפולינום המינימלי הוא ה- lcm של הפולינומים המינימליים של הבלוקים על האלכסון. הבלוקים על האלכסון הם λ_i הע"ע מגודל 1, ולכן ה- lcm שלהם הוא מכפלת $x - \lambda_i$ כאשר λ_i הע"עים השונים, וסה"כ m_T מכפלת גורמים לינאריים שונים.

■

משפט 61 (תוצאה 2 ממשפט הפירוק הפרימרי). נניח $T: V \rightarrow V$ לכסינה, וקיים $W \subseteq V$ תמ"ו T -שמור. אז $T|_W$ לכסינה.

הוכחה. נסמן $S = T|_W$. אנחנו יודעים $m_T(T) = 0$ ולכן $m_T(S) = 0$. ידוע $m_T = \prod_{i=1}^r (x - \lambda_i)$ ולכן m_S מתפרק לגורמים לינאריים זרים, סה"כ S לכסינה.

■

סיכום. $T: V \rightarrow V$ ט"ל, ו-:

$$\forall i \neq j: \gcd(g_i, g_j) = 1 \wedge m_T(x) = \prod_{i=1}^s g_i$$

אז:

$$V = \bigoplus_{i=1}^s \ker(g_i(T)) \wedge \forall i: m_{T|_{\ker g_i(T)}} = g_i$$

המשך בעמוד הבא

Jordan Form 5

5.1 ~ מציאת שורשי פולינום אופייני ממעלה חמישית ואילך

נבחין בבעיה: $A = M_5(\mathbb{Z})$, קבעו אם היא לכסינה מעל \mathbb{C} .

- נחשב את $f_A(x)$
- נמצא שורשים, אלו הם הע"ע
- לכל ע"ע נחשב את v_λ
- אם סכום הממדים מסעיף ג' הוא 5, אז היא לכסינה
- T לכסינה אם"מ קיים בסיס ו"ע אם"מ ריבוי גיאומטרי = ריבוי אלגברי

אבל (המתמטיקאי, לא מילת הניגוד ולא מילה נרדפת ליגון) הוכיח שאין פתרונות לפולינומים ממעלה חמישית ויותר, וגלואה מצא דוגמאות לפולינומים שאי אפשר לבצע עליהם נוסחאות שורשים ופיתח את התורה של הרחבת שדות לשם כך.

היוונים העתיקים ביססו את הגיאומטריה שלהם באמצעות דברים שאפשר לבדוק עם שדה ומחוגה. באמצעות כלים של גלואה אפשר לראות מה אפשר לעשות עם האמצעים האלו, ולהוכיח שלוש בעיות שהיוונים לא הצליחו לפתור – האם אפשר לרבע את המעגל (האם אפשר לבנות באמצעות שדה ומחוגה ריבוע ששטחו שווה לשטח המעגל), או במילים אחרות, האם אפשר למצוא את $\sqrt{\pi}$ – אי אפשר כי זה לא מספר אלגברי. שאלות אחרות היו, בהינתן קובייה, האם אני יכול למצוא קובייה בנפח כפול? באותה המידה אי אפשר למצוא את $\sqrt{3}$. שאלה אחרת הייתה האם אפשר לחלק זווית ל-3 חלקים שווים.

גלואה הראה שכדי לעשות את זה צריך למצוא שורשים שלישיים של כל מני דברים, שבאמצעות סרגל ומחוגה אי אפשר לעשות זאת. בעיות שהיו פתוחות לעולם המתמטי במשך אלפי שנים נפתרו בעזרת אותן התורות.

אבל ניאלץ להאביל את משפחתנו עליו כשמת משפחת בגיל 26. גלואה מת בגיל 21 מדו־קרב.

מסקנה 13 (מסקנת הבדיעבד של גלואה). לא ללכת לדו־קרב.

הוכחה. ההוכחה מתקדמת ועוסקת בתורת גלואה.

הגדרה 45. בהינתן $f(x) = \prod_k (x - \lambda_k)^{r_k} \quad \forall i \neq j: \lambda_i \neq \lambda_j$ אז $f^{\text{red}} := \prod_k (x - \lambda_k)$

משפט 62.

$$f^{\text{red}} = \frac{f}{\gcd(f, f')}$$

הוכחה. נשאר כתרגיל בעבור הקורא. (נתנו לנו את זה בשיעורי הבית)

משפט 63. A לכסינה אם"מ $f_A^{\text{red}}(A) = 0$

למה 3. $f_A^{\text{red}} \mid m_A$ ושוויון אם"מ A לכסינה.

הוכחת הלמה. יהיו $\lambda_1 \dots \lambda_r$ הע"ע של A (אפשר בה"כ להרחיב שדה כדי שהם יהיו קיימים). אז אם $f_A(x) = \prod_{i=1}^r (x - \lambda_i)^{s_i}$ ומתקיים $m_A(x) = \prod_{i=1}^r (x - \lambda_i)^{r_i}$ וידוע $1 \leq r_i \leq s_i$ ולכן $f_A^{\text{red}} \mid m_A$.

עתה נוכיח את החלק השני של הלמה (השוויון). אם A לכסינה, אז יש בסיס של ו"עים ועם λ הוא ע"ע של ו"ע בבסיס B אז $Av_\lambda - \lambda v_\lambda = 0$ ולכן $f_A^{\text{red}}(A) = 0$ וסה"כ $m_A \mid f_A$.

אם $f_A^{\text{red}} = m_A$ אז m_A מכפלה של גורמים לינארית זרים, וראינו גרירה ללכסינות.

הוכחת המשפט באמצעות הלמה. A לכסינה אם"מ f_A^{red} , ואנחנו יודעים כי $m_A(A) = 0$ ולכן A לכסינה אם"מ $f_A^{\text{red}}(A) = 0$.

5.2 ~ צורת ג'ורדן לאופרטור לינארי נילפוטנטי

5.2.1 נילפוטנטיות

מטרה: בהינתן $T: V \rightarrow V$ נרצה לפרק את V לסכומים ישרים של מרחבים T -אינווריאנטים, קטנים ככל האפשר.

הגדרה 46. יהי $T: V \rightarrow V$ ט"ל. נאמר ש- V פריק ל- T אם קיימים $U, W \subseteq V$ תמ"ים כך ש:

$$V = U \oplus W \quad \wedge \quad \dim U, \dim W > 0 \quad \wedge \quad U, W \text{ are } T\text{-invariant}$$

מעטה ואילך (עד סוף הנושא), נניח ש- $f_T(x)$ מתפצל מעל f לגורמים לינארים (כלומר, נרחיב לשדה סגור אלגברית).

הגדרה 47. $T: V \rightarrow V$ ט"ל. T נקראת העתקה נילפוטנטית אם קיים $n \in \mathbb{N}$ כך ש- $T^n = 0$. באופן דומה A תקרא מטריצה נילפוטנטית אם $\exists n \in \mathbb{N}: A^n = 0$.

הגדרה 48. עבור n המינימלי שעבורו $T^n = 0/A^n = 0$, אז n הנ"ל נקרא דרגת הנילפוטנטיות של T/A , ומסמנים $n(T)/n(A)$ "נילפוטנטיות בא מלשון null. הרעיון: דבר מה שמתבטל.

משפט 64 (תוצאה 3 ממשפט הפירוק הפרימרי). בהינתן V אי-פריק ביחס ל- T , ובהנחה ש- $f_T(x)$ מתפצל לגורמים לינאריים, אז $m_T(x) = (x - \lambda)^r$. נוסף על כך $T - \lambda I$ נילפוטנטית ו- $n(T - \lambda I) = r$.

הוכחה. נפרק למקרים.

• אם $m_T(x)$ לא מתפרק, הוא בהכרח לא קבוע אחרת $m_T(T) \neq 0$ וסתירה, לכן $m_T(x) = (x - \lambda)$ לינארי כלשהו (אם לא לינארי ניתן לפרק לגורמים לינאריים ואז מתפרק וסתירה).

• אם $m_T(x)$ מתפרק, אז נוציא גורם לינארי אחד ונקבל $m_T = g_1 \cdots g_i$ כאשר g לינארי, דהיינו ממשפט הפירוק הפרימרי, נניח בשלילה $g_i \neq g_j$ ומהיות m_T מתוקן נקבל $\gcd(g_i, g_j) = 1$ כלומר $\ker \bigoplus_{i=1}^s \ker g_i(T) = V$ ולכן $V = \ker \bigoplus_{i=1}^s \ker g_i(T)$ פריק וסתירה. דהיינו $g_i = g_j$ וסה"כ $m_T(x)$ הוא מהצורה $m_T(x) = g^s = (x - \lambda)^s$ כדרוש.

עתה ניגש להוכיח את החלק השני של ההוכחה. משום ש- $m_T(x) = (x - \lambda)^r$ אזי $M_T(T) = (T - \lambda I)^r = 0$ ולכן $n(T - \lambda I) \leq r$, ומהמינימליות של m_T נסיק $n(T - \lambda I) = r$ כדרוש. ■

נסמן $S = T - \lambda I$ בהקשר לעיל. עוד כדאי להבחין ש- V הוא S -איזוריאנטי (אך לא בהכרח אי-פריק ביחס ל- S) שכן $S(V) = T(V) - \lambda V \in V$ מסגירות לכפל בסקלר λ ולחיבור נגדי.

מה למדנו? שמשום שאנו יכולים לפרק (ממשפט הפירוק הפרימרי) את T למרחבים T -איזוריאנטיים פריקים מינימליים, אז לכל U_i כזה נוכל להגדיר $S_i = T - \lambda_i I$ כזו כך שהיא נילפוטנטית. אם נוכל להבין טוב מה S_i עושה למרחב שהיא שמורה עליו, נוכל להבין באופן כללי מה ההעתקה T עושה לכל אחד מהמרחבים אליהם פריקנו אותה.

למה 4. תהי T העתקה כללית, אז אם $\ker T^i = \ker T^{i+1}$ לכל $j \geq i$ מתקיים $\ker T^i = \ker T^j$.

למה 5. תהי T העתקה כללית, אז $\ker T^i \supseteq \ker T^j \wedge \text{Im } T^i \subseteq \text{Im } T^j$ $\forall i > j$.

משפט 65. תהי $T: V \rightarrow V$ העתקה מעל מ"נסים, $\dim V = n$, אז קיים $\mathcal{F}(T) \in [n]$ כך ש- $\ker T^{\mathcal{F}(T)} = \ker T^{i+\mathcal{F}(T)}$ $\forall i \in \mathbb{N}$. $\ker T^{\mathcal{F}(T)+i} \wedge \text{Im } T^{\mathcal{F}(T)} = \text{Im } T^{\mathcal{F}(T)+i}$

הוכחה. מלמה 5, בהכרח:

$$\ker T \subseteq \ker T^2 \subseteq \ker T^3 \subseteq \cdots \subseteq T^i \subseteq \cdots \subseteq V$$

נניח בשלילה שכל ההכלות עד $i = n$ חלשות, ממשפט נסיק:

$$\dim \ker T < \dim \ker T^2 < \cdots < \dim \ker T^i \leq n$$

כלומר יש n מספרים טבעיים שונים בין $\ker T$ ובין n (לא כולל) ולכן $\dim \ker T < 0$ וסתירה. דהיינו קיים $\mathcal{F}(T)$ כך ש- $\ker T^{\mathcal{F}(T)} = \ker T^{i+\mathcal{F}(T)}$ ומלמה 4 נקבל ש- $\ker T^i = \ker T^{\mathcal{F}(T)}$ $\forall i \geq \mathcal{F}(T)$. ניכר ש- $\text{Im } T^{\mathcal{F}(T)} \supseteq \text{Im } T^i$ לכל $i \geq \mathcal{F}(T)$ וממשפט הממדים $\dim \text{Im } T^{\mathcal{F}(T)} = \dim \text{Im } T^i$ ולכן $\text{Im } T^{\mathcal{F}(T)} = \text{Im } T^i$ $\forall i \geq \mathcal{F}(T)$ כדרוש. ■

משפט 66. בהינתן T העתקה נילפוטנטית, אז $\mathcal{F}(T) = n(T)$.

סימון 7. $\mathcal{F}(T)$ לעיל סימון (שמקובל אך ורק בסיכום הזה), וקרוי ה-"fitting index" של T .

5.2.2 שרשאות וציקליות

הגדרה 49. קבוצה מהצורה $\{v, Tv \cdots T^k v\}$ כאשר $T^{k+1}v = 0$ והוא המינימלי, נקראת שרשרת.

משפט 67. $T: V \rightarrow V$ נילפוטנטית, אז כל שרשרת היא בת"ל.

הוכחה. יהיו $\alpha_0 \cdots \alpha_k \in \mathbb{F}$ כך ש- $\sum_{i=0}^k \alpha_i T^i(v) = 0$. נניח בשלילה שהצירוף אינו טרוויאלי. אז קיים j מינימלי שעבורו $\alpha_j \neq 0$. נניח n המקסימלי שלא מאפס. אז:

$$T^{n-j} \left(\sum \alpha_i T^i(v) \right) = T^{n-j} \left(\sum_{i=j}^k \alpha_i T^i(v) \right) = \alpha_j T^{n-1}(v) + 0 = 0$$

אבל $\alpha_j, T^{n-1} \neq 0$ וזו סתירה. ■

תזכורת. תמ"ו שקיים לו בסיס שהוא שרשרת, נקרא ציקלי.

אנטי-דוגמה: ישנם מ"זים שאינם T -ציקליים. למשל:

$$V = \left\{ f: \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R} \mid f \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = P(x) + h(y) \mid n \leq p, h \right\}$$

ו- T אופרטור הגזירה הפורמלית. כדי ש- V יהיה ציקלי, צריך למצוא בסיס ציקלי שממדו הוא לכל היותר דרגת הנילפוטנטיות. נבחין ש- $n(T) = n + 1$, וידוע ש- $\dim V = 2n + 1$, ולכן שרשרת מקסימלית באורך $n + 1$ ולכן לא יכול להיות בסיס שרשרת. לכן V אינו T -ציקלי.

הערה 21. יהי $T: V \rightarrow V$ נילפוטנטית ו- $\dim V = n$ אז $n(T) \leq n$ וישנו שוויון אמ"מ V ציקלי.

הערה 22. אם $T: V \rightarrow V$ נילפוטנטית ו- V ציקלי אז V אי-פריק ל- T .

הוכחה. נניח בשלילה שישנו פירוק לא טריויאלי של V ל- T . אז $V = U \oplus W$ לא טריויאליים. נסמן $\dim U = k, \dim W = \ell$. וידוע ש- $k, \ell < n$. בה"כ $k \geq \ell$. נסמן $B_v = (v, Tv \dots T^{n-1}v)$. קיימים (ויחידים) $u \in U, w \in W$ כך ש- $v = u + w$. אז:

$$T^k v = T^k u + T^k w$$

אך משום ש- T נילפוטנטית אז $T|_U, T|_W$ נילפוטנטיות גם כן. ידוע $n(T|_U), n(T|_W) \leq k$ ולכן בפרט $T^k(u) = T^k(w) = 0$ ולכן $T^k v = 0$ אבל $T^k v \in B_v$ ו- $k < n \wedge T^k(v) \in B_v$. ■

משפט 68. תהי $T: V \rightarrow V$ נילפוטנטית ונניח U תמ"ו של V הוא T -אינוואריאנטי וציקלי, אז עבור $S = T|_U$:

$$1. \dim U \leq n(T)$$

$$2. \dim T(U) = \dim U - 1 \text{ ו-} \text{Im}(T_U) = T(U)$$

הוכחה.

$$1. \dim U = n(T_U) \text{ וגם } n(T) \geq n(T|_U)$$

$$2. T(U) = \text{span}(Tv \dots T^k v) \text{ ו-} T(u) = T(\text{span}(v, \dots T^k v)) = \text{span}(Tv \dots T(T^k v)) = \text{span}(Tv \dots T^{k+1} v) \\ \dim T(U) = \dim U - 1 \text{ ולכן } T(U)$$

■

הגדרה 50. $U \subseteq V$ תמ"ו ציקלי ייקרא ציקלי מקסימלי אם $\dim U = n(T)$.

משפט 69. לכל V מ"ו, $T: V \rightarrow V$ נילפוטנטית קיים תמ"ו ציקלי מקסימלי.

הוכחה. קיים $v \in V$ כך ש- $T^{n(T)-1}v \neq 0$. אז $v \neq 0$ ו- $v, Tv, \dots, T^{n(T)-1}v$ ומטעה מקודם בת"ל ולכן $\text{span}(v \dots T^{n(T)-1}v)$ תמ"ו ציקלי מקסימלי. ■

משפט 70. נניח $U \subseteq V$ תמ"ו ציקלי מקסימלי. אז:

$$1. \text{אם } T(U) \subseteq T(V) \text{ הוא גם ציקלי מקסימלי.}$$

$$2. U \cap T(V) = T(U)$$

הוכחה.

$$1. U - \text{ציקלי. לכן } \dim T(U) = \dim U - 1 \text{ טענה:}$$

$$\dim T(U) = n(T|_{T(U)}) = n(T) - 1$$

וסיימנו.

$$2. \text{ידוע } T(U) \subseteq U \text{ כי } U \text{ ציקלי ולכן שמור, וכן } U \subseteq V \text{ והסקנו } T(U) \subseteq T(V), \text{ לכן } T(U) \subseteq U \cap T(V)$$

עתה נוכיח שוויון באמצעות שיקולי ממד. אם לא היה שוויון אז:

$$T(U) \subsetneq U \cap T(V) \subseteq U \implies \dim T(U) < \dim(U \cap T(V)) \leq \dim(T(U)) + 1 \implies U \cap T(V) = U$$

זו סתירה כי:

$$U \cap T(V) \subseteq T(V) \implies n(T|_{T(V)}) = n(T) - 1 \implies n(T) = \dim U \leq n(T) - 1$$

■

5.2.3 ניסוח צורת מייקל ג'ורדן לאופרטור נילפוטנטי

משפט 71 (המשלים הישר לתמ"ו ציקלי מקסימלי). נניח $T: V \rightarrow V$ ט"ל לינארית נילפוטנטית, $U \subseteq V$ תמ"ו ציקלי מקסימלי אז קיים $W \subseteq V$ תמ"ו T -איוואריאנטי כך ש- $V = U \oplus W$.

הוכחה. נוכיח באינדוקציה על $n = n(T)$.

בסיס: אם $n(T) = 1$ אז $T = 0$ אז כל $W \subseteq V$ הוא T -איוואריאנטי. והיות שכל קבוצה בת"ל ניתנת להשלמה לבסיס, אז $U = \text{span}(v)$ אז $W = \text{span}(v_2 \dots v_m)$ כאשר $B_V = (v := v_1 \dots v_m)$.

צעד: ("צעד, מעבר, אותו דבר, תקראו לזה איך שבא לכם") נניח שאנו יודעים את נכונות הטענה עבור $n = n(T) - 1$. נוכיח עבור $n = n(T)$. נצמצם את T ל- $T|_{T(V)}$. ידוע $T(U) \subseteq T(V)$ ציקלי מקסימלי. לכן, לפי ה.א. קיים W_1 הוא T -איוואריאנטי כך ש- $T(V) = T(U) \oplus W_1$.

נגדיר $W_2 = \{v \in V \mid Tv \in W_1\}$ אז

למה 6. ("למה א") $U + W_2 = V$ (לאו דווקא סכום ישר) וגם $U \cap W_1 = \{0\}$.

למה 7. ("למה ב") בהינתן $W_1 \subseteq W_2$ ו- $U \subseteq V$ תמ"ו כך ש- $U + W_2 = V$ וגם $U \cap W_1 = \{0\}$ אז קיים $W' \subseteq V$ כך ש- $U \oplus W' = V$ וגם $W_1 \subseteq W' \subseteq W_2$.

נניח שהוכחנו את הלמות. יהי $w \in W_1$ אז $T(w) \in W_1$ ולכן $w \in W_2$ ולכן $W_1 \subseteq W_2$. אז מצאנו W' תמ"ו של V כך ש- $W_1 \subseteq W' \subseteq W_2$. יהי $w \in W'$ בפרט $w \in W_2$ ולכן $T(w) \in W_1 \subseteq W'$.

ולכן מש"ל המשפט. ■

הוכחת למה ב' היא תרגיל רגיל בלינארית 1א שאין ערך להביא את הוכחתו.

הוכחת למה א' גם היא לא מעניינת במיוחד, אבל אותה המרצה כן הוכיח:

הוכחה. יהי $v \in V$, נביט ב- $T(v)$. קיימים $u \in U, w_1 \in W_1$ כך ש-:

$$Tv = Tu + w_1 \implies Tv - Tu = w_1 \implies T(v - u) = w_1 \in W_1$$

ידוע $v = v - u + u$. לכן $v - u \in W_2$ $\implies T(v - u) \in W_1$.

אזי משהו $V = U + W_2$ ו- $W_1 \subseteq T(V)$ ולכן:

$$U \cap W_1 = U \cap (T(V) \cap W_1)$$

ידוע ש-:

$$U \cap W_1 = (U \cap T(V)) \cap W_1 \implies U \cap T(V) = T(U) \implies T(V) = T(U) \oplus W_1 \implies U \cap W_1 = T(U) \cap W_1 = \{0\}$$

■

מסקנה 14. $T: V \rightarrow V$ ט"ל נילפוטנטית אז V אי-פריק ל- T אמ"מ V ציקלי.

הוכחה.

\implies זהו משפט שכבר הוכחנו

\Leftarrow נניח V אי-פריק. אז קיים $U \subseteq V$ תמ"ו ציקלי מקסימלי. לפי המשפט קיים $W \subseteq V$ תמ"ו T -איוואריאנטי כך ש- $T = U \oplus W$. ידוע U, W תמ"וים איוואריאנטי. אם $U = \{0\}$ אז $V = 0$ ובפרט ציקלי. אחרת, מאי-פריקות $V = U$, נסיק ש- $W = \{0\}$ ולכן $V = U$ ציקלי.

■

משפט 72 (משפט ג'ורדן בעבור T נילפוטנטית 1). תהי $T: V \rightarrow V$ נילפוטנטית אז קיים פירוק של V לסכום ישר של $V = \bigoplus U_i$ כאשר U_i הם T -ציקליים.

הוכחה. באינדוקציה על המשפט הקודם: נמצא ב- V ציקלי מקסימלי כלשהו. אז קיים $W \subseteq V$ תמ"ו T -שמוור כך ש- $V = U_1 \oplus W$. ידוע $T|_W: W \rightarrow W$ נילפוטנטית, וכעת באינדוקציה שלמה על $\dim V$.

משפט 73 (משפט ג'ורדן בעבור ט"ל נילפוטנטית 2). עבור $T: V \rightarrow V$ נילפוטנטית, קיים בסיס B של V שהוא איחור של שרשראות.

מסקנה 15. בעבור B בסיס מג'רדן, נסיק:

$$[T]_B = \begin{pmatrix} \square & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \square & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & \square \end{pmatrix}$$

כאשר הבלוקים הם בלוקי ג'ורדן אלמנטרי. בלוק ג'ורדן מהצורה הבאה יקרא אלמנטרי ויסומן:

$$J_n(0) = \begin{pmatrix} \begin{smallmatrix} | \\ T(v) \\ | \end{smallmatrix} & \dots & \begin{smallmatrix} | \\ T(T^k v) \\ | \end{smallmatrix} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & \dots & 0 \\ 1 & \ddots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}$$

(יש ספרים בהם זה ה-transpose של זה).

משפט 74 (יחידות צורת ג'ורדן בעבור ט"ל נילפוטנטית). עבור $T: V \rightarrow V$ נילפוטנטית, אז בכל הפירוקים של $V = \bigoplus U_i$ עבור ציקליים (אי-פריקים) אז מספר תתי-המרחב מממד נתון הוא זהה עבור כל פירוק.

הוכחה. באינדוקציה על $n = n(T)$.

- עבור $n = 1$, העתקת ה-0. מתפרק לסכום ישר של מרחבים מממד 1.
- צעד, נניח נכונות עבור $n \in \mathbb{N}$. נניח ש- $n(T) = n + 1$. נסמן פירוק:

$$V = \bigoplus_{i=1}^k U_i = \bigoplus_{i=1}^{\ell} W_i$$

נסדר את $(u_i)_{i=1}^k$ לפי גודל מימד, ונניח שרשימת הגדלים היא:

$$\underbrace{(1, 1, \dots, 1)}_{\times s} < a_1 \leq \dots \leq a_p \implies s + p := k$$

רשימת הממדים מגודל 1 ועוד כל השאר. נעשה כנ"ל עבור $(w_i)_{i=1}^{\ell}$ ונקבל:

$$\underbrace{(1, 1, \dots, 1)}_{\times t} < b_1 \leq \dots \leq b_r \implies t + r := \ell$$

ידוע:

$$T(v) = \bigoplus_{i=1}^k T(U_i) = \bigoplus_{i=1}^k T(W_i), \quad n(T|_{T(v)}) = n, \quad p = r, \quad \forall i: a_i - 1 = b_i - 1 \implies a_i = b_i$$

(הפירוק ל- s ו- t דרוש כדי שהפירוק לעיל לא יכלול אפסים כאשר מפעילים את T) (ידוע $a_i - 1 = b_i - 1$ כי אינדקס הנילפוטנטיות קטן ב-1 בהחלת T)

משפט הממדים השני אומר ש-:

$$a_i = \dim U_i = \dim \ker T|_{U_i} + \underbrace{\dim \operatorname{Im} T|_{U_i}}_{a_i - 1} \implies \dim \ker T|_{U_i} = 1$$

מהטענה השנייה בלמה:

$$\begin{aligned} \ker T = \bigoplus_{i=1}^k \ker T|_{U_i} &\implies \dim \ker T = \sum_{i=1}^k \dim \ker T|_{U_i} = k \\ &\implies k = \ell \implies s = t \\ &= \sum_{i=1}^{\ell} \dim \ker T|_{W_i} = \ell \end{aligned}$$

■

במילים אחרות: כל מטריצה מייצגת של ט"ל נילפוטנטית דומה למטריצת ג'ורדן יחידה, עד כדי שינוי סדר הבלוקים.

(למה זה שקול? כי הגודל של בלוק הוא הממד של התמו"ו שנפרש ע"י וקטורי הבסיס שמתאימים לעמודות הללו)

למעשה, בכך הבנו לחלוטין כיצד העתקות נילפוטנטיות מתנהגות. עשינו רדוקציה למקרה הפרטי של נילפוטנטיות, ועתה ננסה להבין את המקרה הכללי. ניעזר בתוצאה 3 ממשפט הפירוק הפרימרי לשם כך.

למה 8. נניח $V = \bigoplus_{i=1}^k U_i$ כאשר U_i הוא T -אינווריאנטי (אין צורך להניח נילפוטנטיות), אז:

$$T(V) = \bigoplus_{i=1}^k T(U_i) \quad \text{א.}$$

$$\ker T = \bigoplus_{i=1}^k \ker T(U_i) \quad \text{ב.}$$

הוכחה: נותר כתרגיל בעבור הקורא.

5.3 \sim צורת ג'ורדן לאופרטור לינארי כללי

הגדרה 51. בלוק ג'ורדן אלמנטרי עם ערך λ הוא בלוק מהצורה:

$$J_n(\lambda) = J_n(0) + \lambda I_n = J_n(0) = \begin{pmatrix} \lambda & 0 & \cdots & 0 \\ 1 & \ddots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \lambda & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \lambda \end{pmatrix}$$

הגדרה 52. בהינתן $T: V \rightarrow V$, בסיס B נקרא בסיס מ'ורדן אם $[T]_B$ היא מטריצה עם בלוקי ג'ורדן מינימליים על האלכסון.

משפט 75 (משפט ג'ורדן). לכל העתקה $T: V \rightarrow V$ כאשר V מונ'ס מעל שדה סגור אלגברית \mathbb{K} , קיים בסיס מ'ורדן.

מה עומד לקרות?

1. נפרק את המרחב V לתתי-מרחבים, שכל אחד מהם משויך לערך עצמי λ_i . נעשה זאת בשתי גישות – הראשונה באמצעות משפט הפירוק הפרימרי, והשנייה באמצעות פירוק למרחבים עצמיים מוכללים (שני הפירוקים מניבים את אותם המרחבים).

2. נתבונן על המרחבים האלו, ונסיק שיש העתקה ציקלית עליהם, שאנחנו כבר מכירים את צורת ג'ורדן שלה. היא תאפשר לנו לפרק את המרחבים שקיבלנו לתתי-מרחבים ציקליים, עם בסיס שרשרת שנותן לנו צורת ג'ורדן.

5.3.1 בעזרת פירוק פרימרי

ראשית כל, נוכיח את משפט ג'ורדן באמצעות משפט הפירוק הפרימרי שכבר ראינו.

הוכחה באמצעות פירוק פרימרי. נניח ש- $f_T(x)$ מתפצל לחלוטין. מהגרסה החלשה של משפט הפירוק הפרימרי (ראה הערה תחתיו), מממשט קיילי-המילטון f_T מאפס את T , ותחת הסימון $f_T(x) = \prod_{i=1}^s (x - \lambda_i)^{d_{\lambda_i}}$ מתקיים:

$$V = \bigoplus_{i=1}^s \underbrace{\ker((T - \lambda_i)^{d_{\lambda_i}})}_{U_i}$$

כאשר $U_1 \dots U_n$ הם T -אינווריאנטים. משום ש- U_i האי-פריקים ביחס ל- T , ו- T שמורים. היות שהם אי פריקים $f_{T|_{U_i}} = (x - \lambda)^n$. נגדיר $S = T - \lambda I$. אז U_i הוא T -אינווריאנטי אמ"מ הוא S -אינווריאנטי (טענה שראינו בעבר). ראינו ש- $S|_{U_i}$ היא נילפוטנטית שכן מממשט הפירוק $(T - \lambda_i)^{r_i}$ מאפס את $T|_{U_i}$ (אך לא בהכרח מינימלי, שכן f_T לא בהכרח מינימלי) ולכן $(T - \lambda_i)^{r_i} = S^{r_i} = f|_{U_i}(T) = 0$ כלומר $S|_{U_i}$ נילפוטנטית. ל- $S|_{U_i}$ הוכחנו קיום צורת ג'ורדן, משמע קיים לה בסיס מ'ורדן כך ש- B_i

$$[S|_{U_i}]_{B_i} = [T|_{U_i} - \lambda I_V] = [T|_{U_i}]_{B_i} - \lambda I \implies [T|_{U_i}]_{B_i} = \text{diag}(J_{a_1}(0) \dots J_{a_n}(0)) + \lambda_i I = \text{diag}(J_{\lambda_i}(0) \dots J_{\lambda_i}(\lambda_i))$$

לכן, נוכל לשרשר את הבלוקים הללו ולקבל $B = \bigcup_{i=1}^s B_i$, המקיים:

$$[T|_B] = \text{diag} \{ [T|_{U_1}]_{B_1} \dots [T|_{U_s}]_{B_s} \}$$

משום שכל אחד מ- $[T|_{U_i}]_{B_i}$ הוא בלוק ג'ורדן בעצמו, סה"כ נקבל:

$$[T]_B = \text{diag}(J_1(\lambda_1) \dots J_n(\lambda_j))$$

■

זוהי צורת ג'ורדן של מטריצה כללית.

במילים אחרות – נעזרנו בפירוק פרימרי ע"מ לפרק את המרחב למרחבים T -אינווריאנטים פריקים מינימליים (בהמשך נראה שאלו המרחבים העצמיים הפוכללים של T , שמקיימים כל מיני תכונות נחמדות) ואת המרחבים אליהם פירקנו, ניתחנו בעזרת צורת ג'ורדן להעתקות נילפוטנטיות.

אזהרה! הוכחה של היחידות כרגע בעבודה והיא קצת מאוד שבורה.

משפט 76 (יחידות צורת ג'ורדן הכללית). צורת ג'ורדן היא יחידה עד כדי סדר בלוקים.

הוכחה. תהא צורת ג'ורדן עבור T תהא צורת ג'ורדן עבור T . קיים בסיס B שעבורו:

$$[T]_B = \text{diag}\{J_1(\lambda_1) \dots J_k(\lambda_k)\}$$

אז:

$$V = \bigoplus_{i=1}^k U_i = \bigoplus \bar{v}_\lambda, \quad \bar{v}_\lambda = \bigoplus_{i=s}^\ell U_i$$

כאשר \bar{v}_λ הוא סכום של אי-פריקים שעבורם $T - \lambda I$ נילפוטנטית.

מה ניתן להגיד על הממדים של ה- u_i ים שמרכיבים את \tilde{V}_λ ? הממדים שלהם נקבעים ביחידות, עד כדי סדר, כי היות ש- u_i הם T -איוואריאנטי הם גם $(T - \lambda I)$ -איוואריאנטי, ולכן $[S|_{\tilde{V}_\lambda}]_{B_\lambda}$ היא ג'ורדן נילפוטנטית ואז:

$$[T|_{\tilde{V}_\lambda}]_{B_\lambda} = [S|_{\tilde{V}_\lambda}]_{B_\lambda}$$

■

הגיון: המרחבים \tilde{V}_λ נקבעים ביחידות ללא תלות בפירוק שבחרנו.

5.3.2 בעזרת מרחביים עצמיים מוכללים

בגישה הזו נוכל לפתח את צורת ג'ורדן למטריצה כללית ללא צורך בפירוק פרימרי, פולינום מינימלי, משפט קיילי-המילטון וכו'. זו גישה יותר אלמנטרית ופשוטה, ואם מבינים אותה האלגוריתם המסורבל למציאת צורת ג'ורדן הופך לאינטואיטיבי בהרבה.

הגדרה 53. המרחב העצמי המוכלל של λ הוא \tilde{V}_λ :

$$\tilde{V}_\lambda := \bar{V}_\lambda := \{v \in V \mid \exists n \in \mathbb{N}: (T - \lambda I)^n v = 0\}$$

משפט 77. המרחב העצמי המוכלל הוא \tilde{V}_λ .

מסקנה 16. באופן מידי נסיק $V_\lambda \subseteq \tilde{V}_\lambda$.

הגדרה 54. וקטור עצמי מוכלל הוא וקטור $v \in V$ כך ש- $T^{(i)}v = \lambda v$ $\exists i \in [n]$.

הערה 23. החלק הזה ואילך, אז סוף הפרק, הינו הרחבה שלי בלבד ואילו אינם משפטים המופיעים בקורס. עם זאת, המשפטים להלן מאפשרים להבין בצורה הרבה יותר טובה את צורת ג'ורדן, ולעיתים קרובות תצטרכו להוכיח אותם בעצמכם.

הערה 24. מרגישים אבודים? אני ממליץ על הסרטון הבא.

משפט 78. תהי העתקה T כללית ו- $\lambda \in \mathbb{F}$ סקלר, אז $\tilde{V}_\lambda = \mathcal{N}(T - \lambda I)^{\dim V}$ (כאשר \mathcal{N} המרחב המאפס/הקרנל של המטריצה)

הוכחה. נוכיח באמצעות הכלה דו כיוונית. הכיוון $\mathcal{N}(T - \lambda I)^{\dim V} \subseteq \tilde{V}_\lambda$ טריויאלי. יהי $v \in \mathcal{N}(T - \lambda I)^j$, אם $j < \dim V$ אז $(T - \lambda I)^j v = 0$ ולכן $(T - \lambda I)^{\dim V} v = 0$ ושה"כ $v \in \mathcal{N}(T - \lambda I)^{\dim V}$ אחרת $j > \dim V$ ואז הוכחנו $\mathcal{N}(T - \lambda I)^j = \mathcal{N}(T - \lambda I)^{\dim V}$ נסיק מעקרון ההכלפה:

$$\tilde{V}_\lambda = \bigcup_{j=1}^{\infty} \mathcal{N}(T - \lambda I)^j = \bigcup_{j=1}^{\dim V} \mathcal{N}(T - \lambda I)^j \cup \bigcup_{j=\dim V}^{\infty} \mathcal{N}(T - \lambda I)^j = \mathcal{N}(T - \lambda I)^{\dim V}$$

■

משפט 79. בהינתן v ו"ע מוכלל של T , קיים (מהגדרה) ויחיד λ_i כך ש- $v \in \tilde{V}_{\lambda_i}$.

■

הוכחה. ההוכחה בעיקר אלגברית ולא מעניינת במיוחד, יש צורך לפתח את הבינום של ניוטון.

מסתבר, שאפשר לפרק את המרחב למרחביים עצמיים מוכללים, ומשם אפשר להסיק מה קורה בהם ביתר פרטים בעזרת העתקות נילפוטנטיות.

משפט 80. הטענות הבאות מתקיימות:

1. \tilde{V}_{λ_i} הוא T -איוואריאנטי.

2. $(T - \lambda_i I)|_{\tilde{V}_{\lambda_i}}$ נילפוטנטית.

3. מעל שדה סגור אלגברית, הריבוי האלגברי d_{λ_i} הוא $\dim \tilde{V}_{\lambda_i}$.

הוכחה.

1. יהי $v \in \tilde{V}_{\lambda_i}$, אז קיים $k \leq \mathcal{F}(T)$ כך ש- $(T - \lambda I)^k v = 0$. נפעיל את T על שני האגפים ונקבל $(T - \lambda I)^{k+1} v = 0$.
 $T(0) = 0$ ולכן $Tv \in \tilde{V}_{\lambda_i}$. סה"כ \tilde{V}_{λ_i} הוא T -אינווריאנטי.

2. נגדיר $S = (T - \lambda_i I)|_{\tilde{V}_{\lambda_i}}$. לכן לכל $v \in \tilde{V}_{\lambda_i}$ מתקיים $S^k v = 0$ עבור $k \leq \mathcal{F}(T)$.
 $\exists k_v: (T - \lambda_i I)^{k_v} v = S^{k_v} v = 0$. משום ש- $\forall v \in \tilde{V}_{\lambda_i}: S^n v = 0$ עבור $n \leq \mathcal{F}(T)$, נילפוטנטיות S נילפוטנטית כדרוש.

3. (הוכחה זו נכתבה בעזרתו האדיבה של chatGPT) נסמן $U = \tilde{V}_{\lambda_i}$, ונרחיב את הבסיס של U לבסיס של V כך שנוצר מ"ו W כך ש- $U \oplus W = V$. ממשפט $p_T(x) = p_{T|_U}(x) \cdot p_{T|_W}(x)$. מסעיף קודם ידוע ש- $S := (T - \lambda_i I)|_U$ נילפוטנטית, לכן n כך ש- $S^n|_U = 0$. נכתוב את T באופן הבא: $T|_U = S|_U + \lambda_i I|_U \implies T|_U = S|_U + \lambda_i I|_U$. נקבל שתי הבחנות:

• λ_i הוא הע"ע היחיד של $T|_U$, והוא ע"ע $\lambda_i \in U = \tilde{V}_{\lambda_i}$ ולכן λ_i ע"ע של $T|_U$, והיחידות נובעת מכך שכל ע"ע מוכלל שייד לע"ע יחיד של T .

• $S|_W$ הפיכה, שכן בבירור $\tilde{V}_{\lambda_i} = U = V_{\lambda_i} \subseteq \ker(T - \lambda_i I) = \ker S|_W \subseteq \ker(T - \lambda_i I) = V_{\lambda_i} \subseteq \tilde{V}_{\lambda_i} = U$ ולכן $\ker S \subseteq W \cap U = \{0\}$.
 נסיק משתי הטענות הללו שתי מסקנות:

• מהיות λ_i הע"ע היחיד של $T|_U$, ומהיות $\deg p_{T|_U} = \dim U$, ויחדיו עם ההנחה שאנחנו בשדה סגור אלגברית, $p_{T|_U}(x) = (x - \lambda_i)^{\dim U}$ בהכרח מורכב מ- $\dim U$ גורמים לינאריים שהם $(x - \lambda_i)$.

• λ_i איננו ע"ע של $T|_W$, בגלל שאם (בשליחה) λ_i ע"ע של $T|_W$ עם ו"ע v אז $v = S v + \lambda_i v$ אז $v = S v$ ומחיסור אגפים נקבל $S v = 0$, כלומר $v = 0$ (כי $S|_W$ הפיכה) ואז לא ו"ע וסתירה.

סה"כ, מהיות $p_T(x) = p_{T|_U}(x) \cdot p_{T|_W}(x)$, נקבל שהריבוי האלגברי של $(x - \lambda_i)$ בא $\deg p_{T|_U}$ ורק מ- $\deg p_{T|_W}$ ושם הריבוי הוא $\dim U$, כלומר סה"כ הריבוי האלגברי של λ_i בהעתקה T הוא $\dim U = \dim \tilde{V}_{\lambda_i}$ כדרוש.

■

הגדרה 55. v הוא ו"ע עצמי מורחב של λ_i מדרגה k אם הוא ו"ע עצמי מורחב של λ_i כך ש- $v \in \ker(T - \lambda I)^k \setminus \ker(T - \lambda I)^{k-1}$.
 כאשר בסיס $k = 1$ מוגדר להיות $v \in V_{\lambda_i}$.

משפט 81 (פירוק המרחב למרחבים עצמיים מוכללים). נניח שאנחנו במ"ו סגור אלגברית (אפשר להרחיב לכזה במידת הצורך).
 אז ל- T יש ע"עים $\lambda_1 \dots \lambda_k$ כלשהם. בהינתן V מ"ו ו- T העתקה לינארית, מההרחבה יש לה ערכים עצמיים $\lambda_1 \dots \lambda_k$ כלשהם.
 אז:

$$V = \bigoplus_{i=1}^k \tilde{V}_{\lambda_i}$$

הוכחה. נתחיל מלהוכיח שהחיתוך בין שני מרחבים עצמיים מוכללים ריק. זה נובע ישירות מכך שכל שני ע"ע עצמיים מוכללים שייכים לע"ע רגיל יחיד של T . ניעזר בכך ש- $\dim \tilde{V}_{\lambda_i} = d_{\lambda_i}$, ונקבל:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n \dim \tilde{V}_{\lambda_i} = \sum_{i=1}^n d_{\lambda_i} = n \\ \forall i \in [k]: \tilde{V}_{\lambda_i} \subseteq V \\ \forall i, j \in [k]: \tilde{V}_{\lambda_i} \cap \tilde{V}_{\lambda_j} = \{0\} \end{cases}$$

כאשר d_{λ_i} הריבוי האלגברי של λ_i , וידוע סכום הריבויים האלגבריים הוא n שכן $p_T(x)$ פולינום ממעלה n . לכן ממשפט יש סכום ישר כדרוש.

■

עתה נוכיח מחדש את משפט ג'ורדן, אך הפעם ללא תלות בפולינום מינימלי ופירוק פרימרי.

הוכחה באמצעות מרחבים עצמיים מוכללים. תהי העתקה T . מפריקות הפולינום האופייני יש לה $\lambda_1 \dots \lambda_k$ ע"עים כלשהם. ממשפט:

$$V = \bigoplus_{i=1}^k \tilde{V}_{\lambda_i}$$

עוד ידוע שהעתקה $S_i = (T - \lambda_i)|_{\tilde{V}_{\lambda_i}}$ נילפוטנטית. כבר הוכחנו את צורת ג'ורדן עבור העתקות נילפוטנטיות ולכן ל- S_i קיים בסיס מג'ורדן \mathcal{B}_i . נבחר ש-:

$$T|_{\tilde{V}_{\lambda_i}} = S_i + \lambda_i I|_{\tilde{V}_{\lambda_i}} \implies [T|_{\tilde{V}_{\lambda_i}}]_{\mathcal{B}_i} = \underbrace{\text{diag}\{J_{a_1}(0) \dots J_{a_\ell}(0)\}}_{[S_i]_{\mathcal{B}_i}} + \lambda_i I = \text{diag}(J_{a_1}(\lambda_i) \dots J_{a_\ell}(\lambda_i))$$

ולכן אפשר לשרשר את הבסיסים לכדי בסיס מג'רדן: $B = \bigcup_{i=1}^k B_i$, ואכן:

$$[T]_B = \text{diag} \left([T|_{\tilde{V}_{\lambda_i}}]_{B_i} \mid i \in [k] \right) = \text{diag} (J(\lambda_1) \dots J(\lambda_1) \dots J(\lambda_k) \dots J(\lambda_k))$$

■

שרשור של בלוקי ג'ורדן.

הערה 25. מיחידות צורת ג'ורדן, הצורה המתקבלת מפירוק פרימרי ומפירוק למרחבים עצמיים מוכללים היא זהה. דרך אחרת לראות את זה, היא שהמרחבים אליהם פירקנו פרימריים שהם $\tilde{V}_{\lambda_i} = (T - \lambda_i)^{d_{\lambda_i}}$ בכל מקרה.

5.4 ~ תוצאות מצורת ג'ורדן

משפט 82. כמות בלוקי הג'ורדן לע"ע λ היא הריבוי הגיאומטרי.

משפט 83. כמות הוקטורים בבסיס המג'רדן המשייכים ל- λ הוא הריבוי האלגברי d_{λ} (ניסוח אחר: סכום גדלי הבלוקים השייכים ל- λ בצורת הג'ורדן הוא d_{λ}).

הוכחה. ראינו בצורת ג'ורדן בעזרת פירוק למרחבים עצמיים מוכללים, שמספר הוקטורים השייכים ל- λ הוא $\dim \tilde{V}_{\lambda}$ וידוע שזה מ"ו מממד d_{λ} . סה"כ הראינו את הדרוש.

■

משפט 84. בלוק הג'ורדן המשוך ל- λ הגדול ביותר, הוא הריבוי של $(x - \lambda)$ בפולינום $m_T(x)$.

הוכחה. ראינו שבלוק הג'ורדן $J_a(\lambda)$ מגיע מפירוק ג'ורדן של $S = (T - \lambda)_{\tilde{V}_{\lambda}}$. הבלוק הכי גדול בצורת הג'ורדן של S נילפוטנטית, היא השרשרת הכי ארוכה של S ב- \tilde{V}_{λ} . משום ש- $S^{n(S)} = \{ \ker S^k \mid k \in [n] \} = \tilde{V}_{\lambda}$, השרשרת הארוכה ביותר האפשרית היא $S^{n(S)}v, Sv, \dots, v$ והיא קיימת כי הסדרה הזו בת"ל עבור v כלשהו (אחרת $n(S)$ לא החזקה המינימלית שמאפסת את S וסתירה).

ראינו ש- m_T הוא lcm של הצמצום של T למרחבים T -אינווריאנטים, ומשום שכל \tilde{V}_{λ_k} בעל פולינום אופייני $(x - \lambda_k)^{d_{\lambda_k}}$, ו- $\gcd((x - \lambda_i)^k, (x - \lambda_j)^m) = 1$ ובגלל ש- $m_{T|_{\tilde{V}_{\lambda}}}(x)$ מחלק את $p_{T|_{\tilde{V}_{\lambda}}}(x)$, אז $m_{T|_{\tilde{V}_{\lambda}}}(x) = (x - \lambda)^k$ עבור $k \in [r_{\lambda}]$ כלשהו. אז:

$$\forall i \neq j \in [k]: \gcd(T|_{\tilde{V}_{\lambda_i}}(x), T|_{\tilde{V}_{\lambda_j}}(x)) = 1$$

דהיינו, lcm זה פשוט כפל של הפולינומים המינימליים של $T|_{\tilde{V}_{\lambda}}$. לכן, תחת הסימון m_{λ} להיות הריבוי של λ בפולינום m_T , בהכרח $m_{T|_{\tilde{V}_{\lambda}}}(x) = (x - \lambda)^{m_i}$. מהגדרת פולינום מינימלי, m_{λ} הוא המינימלי כך ש- $(T - \lambda)^{m_i} = 0$. כלומר m_{λ} המינימלי כך ש- $S^{m_{\lambda}} = 0$. סה"כ m_{λ} דרגת הנילפוטנטיות של S . הראנו ש- $n(S)$ השרשרת המקסימלית בצורת הג'ורדן של S , וסה"כ בלוק הג'ורדן הגדול ביותר של $J(\lambda)$ הוא הריבוי של $(x - \lambda)$ ב- $m_T(x)$.

■

משפט 85. תהי $A \in M_n(\mathbb{K})$ מטריצה, כאשר \mathbb{K} סגור אלגברית. אז $A \sim A^T$.

הוכחה. ממשפט ג'ורדן ל- A יש צורת ג'ורדן Λ , כלומר קיימת P הפיכה כך ש- $P^{-1}AP = \Lambda$. מטריצה אלכסונית עם בלוקי ג'ורדן. נבחין בכך ש- $A^T = (P^{-1}AP)^T = P^T \Lambda^T (P^{-1})^T = P^T \Lambda^T (P^{-1})^T$. כלומר $A^T \sim \Lambda^T \wedge A \sim \Lambda$. נותר להוכיח $\Lambda \sim \Lambda^T$, כלומר, כל בלוק ג'ורדן $J_i(\lambda) \sim J_i(\lambda)^T$. טענה זו אכן מתקיימת בעבור מעבר לבסיס הסדור $(e_n \dots e_1) \rightarrow (e_1 \dots e_n)$. סה"כ אכן כל מטריצה דומה לשחלוף שלה.

■

המשך בעמוד הבא

6 Bi-Linear Forms 6

6.1 ~ הגדרות בסיסיות בעבור תכונות בי-לינאריות כלליות

הגדרה 56. יהי V מ"ו מעל \mathbb{F} . פונקציונל לינארי φ מעל V הוא $\varphi: V \rightarrow \mathbb{F}$.

הערה 26. ראה הרחבה על פונקציונלים לינארים ומרחבים דואלים בסוף הסיכום.

הגדרה 57. יהיו V, W מ"וים מעל \mathbb{F} . תבנית בי-לינארית על $V \times W$ הינה העתקה $f: V \times W \rightarrow \mathbb{F}$ כך ש- $\forall v_0 \in V \forall w_0 \in W$ כך ש- $f(v, w) = f(v_0, w_0) + f(v - v_0, w)$ ו- $f(v, w) = f(v, w_0) + f(v, w - w_0)$ הן פונקציונליים לינאריים.

אינטואיטיבית, זו ההעתקה לינארית בכל אחת מהקורדינאטות בנפרד (בדומה לדוגמה לדטרמיננטה, שהיא העתקה מולטי-לינארית ולינארית בכל אחת מהשורות בנפרד)

משפט 86. הטענה הבאה שקולה לכך ש- f בי-לינארית. יהיו $\forall v \in V, w \in W, \alpha \in \mathbb{F}$:

$$\begin{aligned} \forall v_1, v_2 \in V: f(v_1 + v_2, w) &= f(v_1, w) + f(v_2, w) \\ \forall w_1, w_2 \in W: f(v, w_1 + w_2) &= f(v, w_1) + f(v, w_2) \\ f(\alpha v, w) &= \alpha f(v, w) = f(v, \alpha w) \end{aligned}$$

בשביל העתקות n -לינאריות צריך טנזור n ממדי. זה לא נעים ויודעים מעט מאוד על האובייקטים הללו. בפרט, בעבור העתקה בי-לינארית נראה שנוכל לייצג אותה באמצעות מטריצות, בלי טנזור ובלגנים – שזה נחמד, וזו אחת הסיבות שאנו מתעסקים ספציפית עם העתקות בי-לינאריות (פרט לכך שמאוחר יותר נעסוק גם במכפלות פנימיות, וחלק מהתוצאות על ההעתקות בי-לינאריות יעזרו לנו להגיד דברים על מטריצות).

דוגמאות.

1. תבנית ה-0: $\forall v, w: f(v, w) = 0$
2. נגדיר $V = W = \mathbb{R}^2$, אז $f\left(\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix}\right) = 2xu + 5xv - 12yu$
3. (חשוב) על \mathbb{F}^n :

הגדרה 58. לכל שדה \mathbb{F} מוגדרת התבנית הבי-לינארית הסטנדרטית היא:

$$f\left(\begin{pmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} y_1 \\ \vdots \\ y_n \end{pmatrix}\right) = \sum_{i=1}^n x_i y_i$$

4. יהיו $\varphi: V \rightarrow \mathbb{F}, \psi: W \rightarrow \mathbb{F}$ פונקציונליים לינאריים: $f(v, w) = \varphi(v) \cdot \psi(w)$

5. הכללה של 4: יהיו $\varphi_1 \dots \varphi_k: V \rightarrow \mathbb{F}$ פונקציונליים לינאריים וכן $\psi_1 \dots \psi_k: W \rightarrow \mathbb{F}$ פונקציונליים לינאריים. אז ההעתקה הבאה בי-לינארית: $f(v, w) = \sum_{i=1}^k \varphi_i(v) \psi_i(w)$

הרעיון: ברגע שנקבע וקטור ספציפי נקבל לינאריות של הוקטור השני.

הערה 27. במקרה ש- $\mathbb{F} = \mathbb{R}$, לעיל, התבנית הבי-לינארית הסטנדרטית משרה את הגיאומטריה האוקלידית. כלומר $v \perp u \iff f(v, u) = 0$.

הערה 28. בעתיד נראה שכל תבנית בי-לינארית נראית כמו מקרה 5.

משפט 87. נסמן את מרחב התבניות הבי-לינאריות על $V \times W$ בתור $B(V, W)$. זהו מ"ו מעל \mathbb{F} .

אני ממש לא עומד להגדיר את החיבור והכפל בסקלר של המשפט הקודם כי זה טריוויאלי והמרצה כותב את זה בעיקר בשביל להטריל אותנו.

דוגמה חשובה אחרת.

משפט 88. נסמן ש- $\dim V = n, \dim W = m$ ותהי $A \in M_{n \times m}(\mathbb{F})$. יהי \mathcal{A} בסיס ל- B , \mathcal{B} בסיס ל- W . אז:

$$f(u, w) = [v]_{\mathcal{A}}^T \cdot A \cdot [w]_{\mathcal{B}}$$

העתקה בי-לינארית.

הוכחה. נקבע v כלשהו:

$$[v]_{\mathcal{A}}^T \cdot A =: B \in M_{1 \times m}, \quad g(w) := f(v, w) = B[w]_{\mathcal{B}}$$

נוכיח ש- g לינארית:

$$\forall w_1, w_2 \in W, \lambda_1, \lambda_2 \in \mathbb{F}: g(\lambda_1 w_1 + \lambda_2 w_2) = B[\lambda_1 w_1 + \lambda_2 w_2]_{\mathcal{B}} = \lambda_1 (B[w_1]_{\mathcal{B}}) + \lambda_2 (B[w_2]_{\mathcal{B}}) = \lambda_1 g(w_1) + \lambda_2 g(w_2)$$

נקבע w , ובאופן דומה נגדיר $C = A[w]_B \in M_{n \times 1}(\mathbb{F})$ ו- $h(v) := f(v, w) = [v]_B^T C$

$$\forall v_1, v_2 \in V, \lambda_1, \lambda_2 \in \mathbb{F}: h(\lambda_1 v_1 + \lambda_2 v_2) = [\lambda_1 v_1 + \lambda_2 v_2]_B^T = \lambda_1 [v_1]_B^T + \lambda_2 [v_2]_B^T = \lambda_1 ([v_1]_B^T C) + \lambda_2 ([v_2]_B^T C) = h(v_1) + h(v_2)$$

■

(זה \mathcal{A} , אתם תסתדרו) – המרצה ברגע שיש לו שני A -ים על הלוח

הגדרה 59. בהינתן תבנית בי-לינארית $f: V \times W \rightarrow \mathbb{F}$ ונניח ש- \mathcal{A} בסיס ל- V , \mathcal{B} בסיס ל- W . נגדיר את המטריצה המייצגת את f ביחס לבסיסים \mathcal{A}, \mathcal{B} ע"י $A \in M_{n \times m}(\mathbb{F})$ כאשר $(A)_{ij} = f(v_i, w_j)$ (נסמן $\mathcal{A} = (v_i)_{i=1}^n$, $\mathcal{B} = (w_j)_{j=1}^m$)

משפט 89. $f(v, w) = [v]_{\mathcal{A}}^T A [w]_{\mathcal{B}}$

הוכחה. קיימים ויחידים $\alpha_1 \dots \alpha_n, \beta_1 \dots \beta_m \in \mathbb{F}$ כך ש- $v = \sum \alpha_i v_i$, $w = \sum \beta_j w_j$. כלומר:

$$[v]_{\mathcal{A}}^T = (\alpha_1 \dots \alpha_n), \quad [w]_{\mathcal{B}} = \begin{pmatrix} \beta_1 \\ \vdots \\ \beta_m \end{pmatrix}$$

ומכאן פשוט נזרוק אלגברה:

$$\begin{aligned} f(v, w) &= f\left(\sum_{i=1}^n \alpha_i v_i, w\right) = \sum_{i=1}^n \alpha_i f(v_i, w) \\ &= \sum_{i=1}^n \alpha_i f\left(v, \sum_{j=1}^m \beta_j w_j\right) = \sum_{i=1}^n \alpha_i \left(\sum_{j=1}^m \beta_j f(v_i, w_j)\right) \\ &= \sum_{i,j \in [n] \times [m]} \alpha_i f(v_i, w_j) \beta_j \\ &= \left(\sum_{i=1}^n \alpha_i a_{i1}, \sum_{i=1}^n \alpha_i a_{i2}, \dots, \sum_{i=1}^n \alpha_i a_{im}\right) \begin{pmatrix} \beta_1 \\ \vdots \\ \beta_m \end{pmatrix} \\ &= (\alpha_1 \dots \alpha_n) \begin{pmatrix} a_{11} & \dots & a_{1m} \\ \vdots & & \vdots \\ a_{n1} & \dots & a_{nm} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \beta_1 \\ \vdots \\ \beta_m \end{pmatrix} \end{aligned}$$

■

סימון 8. נאמץ לסיכום הזה את הסימון $[f]_{\mathcal{A}, \mathcal{B}}$ עבור המטריצה המייצגת של f בי-לינארית.

(זהו אינו סימון רשמי בקורס אם כי בהחלט צריך להיות)

משפט 90. עם אותם הסימונים כמו קודם:

$$\psi: B(v, w) \rightarrow M_{n \times m}(\mathbb{F}), \quad f \mapsto [f]_{\mathcal{A}, \mathcal{B}}$$

אז ψ איזו.

הוכחה. נסמן את $A = [f]_{\mathcal{A}, \mathcal{B}}$ ואת $B = [g]_{\mathcal{A}, \mathcal{B}}$. אז:

• לינאריות.

$$\begin{aligned} (\mathcal{P}(f+g))_{ij} &= (f+g)(v_i, w_j) \\ &= f(v_i, w_j) + g(v_i, w_j) \\ &= (A)_{ij} + (B)_{ij} \\ &= (\psi(f))_{ij} + (\psi(g))_{ij} \implies \psi(f+g) \\ &= \psi(f) + \psi(g) \end{aligned}$$

באופן דומה בעבור כפל בסקלר:

$$(\psi(\alpha f))_{ij} = \alpha f(v_i, w_j) = \alpha (\psi(f))_{ij} \implies \psi(\alpha f) = \alpha \psi(f)$$

- **חח"ע.** תהי $f \in \ker \psi$, אז: $\forall i, j \in [n] \times [m]: f(v_i, w_j) = 0$ $\implies \forall v \in V, w \in W: \psi(f) = 0 \in M_{n \times m}$ (עם אותם הסימונים כמו קודם)
- **על.** תהי $M_{n \times m}(\mathbb{F})$. נגדיר $f(v, w) = [v]_{\mathcal{A}}^T A [w]_{\mathcal{B}}$ ואכן $f(v, w) = e_i^T A e_j = (A)_{ij}$.

■

תזכורת (מלינארית 1). מטריצת המעבר מבסיס \mathcal{B} לבסיס \mathcal{C} מוגדרת להיות $[I]_{\mathcal{C}}^{\mathcal{B}}$, היא מטריצה הפיכה, ומתקיים השוויון $[I]_{\mathcal{B}}^{\mathcal{C}} [I]_{\mathcal{C}}^{\mathcal{B}} = [I]_{\mathcal{C}}^{\mathcal{C}}$.

משפט 91. יהיו V, W מ"מים מעל \mathbb{F} נניח $\mathcal{A}, \mathcal{A}' \subseteq V$ וכן $\mathcal{B}, \mathcal{B}' \subseteq W$ בסיסים של V, W . תהי $f \in B(V, W)$. תהי המייצגת של f לפי \mathcal{A}, \mathcal{B} היא A ותהי A' המייצגת בבסיסים $\mathcal{A}', \mathcal{B}'$. תהי P מטריצת המעבר מ- \mathcal{A} ל- \mathcal{A}' ו- Q מטריצת המעבר מ- \mathcal{B} ל- \mathcal{B}' , אז $A' = P^T A Q$.

הוכחה. ידוע:

$$P[v]_{\mathcal{A}} = [v]_{\mathcal{A}'}, \quad Q[w]_{\mathcal{B}} = [w]_{\mathcal{B}'}$$

ואכן:

$$f(v, w) = [v]_{\mathcal{A}}^T A [w]_{\mathcal{B}} = (P[v]_{\mathcal{A}'})^T A (Q[w]_{\mathcal{B}'}) = [v]_{\mathcal{A}'}^T (P^T A Q) [w]_{\mathcal{B}'} \implies A' = P^T A Q$$

■

כדרוש.

הגדרה 60. עבור $f \in B(V, W)$ נגדיר את $\text{rank } f = \text{rank } A$ כאשר A מייצגת אותה ביחס לבסיסים כלשהם.

משפט 92. $\text{rank } f$ מוגדר היטב.

הוכחה. כפל בהפיכה לא משנה את דרגת המטריצה (ו-transpose של מטריצה הוא הפיך), ומטריצת שינוי הבסיס הפיכה, דהיינו כפל מטריצות שינוי הבסיס לא משנות את דרגת המטריצה ולכן לכל שני נציגים אותה הדרגה.

■

מסקנה 17. תהא $f \in B(V, W)$ ונניח $\text{rank } f = r$. אז קיימים בסיסים \mathcal{A}, \mathcal{B} של V, W בהתאמה כך ש- $[f]_{\mathcal{A}, \mathcal{B}} = \begin{pmatrix} I_r & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$. הרעיון הוא לדרג את כל כיוון, שורות באמצעות transpose ועמודות באמצעות המטריצה השנייה. אפשר גם לקבע בסיס, ולדרג שורות ועמודות עד שיוצאים אפסים (הוכחה לא נראתה בכיתה).

"חצי השעה הזו גרמה לי לשנוא מלבנים בצורה יוקדת" - מעתה ואילך נתעסק במקרה בו $V = W$. נשתמש בבסיס יחיד.

6.2 \sim חפיפה וסימטריות

הגדרה 61. יהיו $A, A' \in M_n(\mathbb{F})$, נאמר שהן חופפות אם קיימת הפיכה $P \in M_n(\mathbb{F})$ כך ש- $A' = P^T A P$.

משפט 93. מטריצות חופפות אמ"מ הן מייצגות את אותה התבנית הבי-לינארית.

משפט 94. אם A, A' חופפות, אז:

$$\text{rank } A = \text{rank } A^T \quad 1.$$

$$\exists 0 \neq c \in \mathbb{F}: \det A' = c^2 \det A \quad 2.$$

הוכחה. הגדרנו $\text{rank } f$ כאשר f בי-לינארית להיות הדרגה של המייצגת את התבנית, וראינו שהיא לא תלויה בבסיס. בכך למעשה כבר הוכחנו את 1. עבור 2, מתקיים $A' = P^T A P$ ו- P הפיכה (ולמעשה מטריצת מעבר בסיס) ולכן אם נסמן $c = |P| = |P^T|$ מתקיים:

$$|A'| = |P^T A P| = |P^T| \cdot |A| \cdot |P| = |P|^2 |A| = c^2 |A|$$

■

הערה 29. יש שדות שמעליהם טענה 2 לא מעניינת במיוחד (שדות עבורם יש שורש לכל מספר, כמו \mathbb{C}).

הגדרה 62. תבנית f מעל V נקראת סימטרית אם:

$$\forall v, w \in V: f(v, w) = f(w, v)$$

הגדרה 63. תבנית f מעל V נקראת אנטי-סימטרית אם:

$$\forall v, w \in V: f(v, w) = -f(w, v)$$

משפט 95 (פירוק תבנית בי-לינארית לחלק סימטרי וחלק אנטי-סימטרי). אם $\text{char } \mathbb{F} \neq 2$, בהינתן תבנית $f: V \times V \rightarrow \mathbb{F}$ בי-לינארית, קיימות $\varphi, \psi: V \times V \rightarrow \mathbb{F}$ בי-לינאריות כך ש- $f = \varphi + \psi$ סימטרית, ψ אנטי-סימטרית ו- $f = \varphi + \psi$.

הוכחה. נבחין שאם $\text{char } \mathbb{F} \neq 2$, ניתן להגדיר את:

$$\varphi(v, w) = \frac{f(v, w) + f(w, v)}{2}, \quad \psi(v, w) = \frac{f(v, w) - f(w, v)}{2}$$

■ מתקיים ש- φ סימטרית ו- ψ אנטי-סימטרית וכן $f = \varphi + \psi$.

משפט 96. תהי f תבנית בילינארית על V , ו- $B = (v_i)_{i=1}^n$ בסיס ל- B . נניח $A = (a_{ij})_{i,j=1}^n$ המייצגת את f ביחס ל- B . אז f סימטרית/אנטי-סימטרית אם A סימטרית/אנטי-סימטרית.

הוכחה.

\Rightarrow אם f סימטרית/אנטי-סימטרית, אז:

$$\begin{aligned} a_{ij} &= f(v_i, v_j) \stackrel{\text{Sym}}{=} f(v_j, v_i) = a_{ji} \\ a_{ij} &= f(v_i, v_j) \stackrel{\text{ASym}}{=} -f(v_j, v_i) = -a_{ji} \end{aligned}$$

\Leftarrow אם A סימטרית אז:

$$f(v, w) = [u]_B^T A [w]_B \stackrel{(1)}{=} ([u]_B^T A [w]_B)^T = [w]_B^T A^T ([u]_B^T)^T = [w]_B^T A [u]_B = f(w, v)$$

כאשר (1) מתקיים כי transpose למטריצה מגודל 1×1 מחזיר אותו הדבר. וכן במקרה האנטי-סימטרי:

$$f(u, w) = [w]_B^T (-A) [u]_B = -[w]_B^T A [u]_B = -(w, u)$$

■

6.3 \sim תבנית ריבועית

הגדרה 64. תהא f תבנית על V . התבנית הריבועית:

$$Q_f: V \rightarrow \mathbb{F}, \quad Q_f(v) = f(v, v)$$

היא לא העתקה לינארית. היא תבנית ריבועית. **דוגמאות:**

- $f\left(\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix}\right) = xv + uy \Rightarrow Q\left(\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}\right) = xy + yx = 2xy$
- $f\left(\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix}\right) = xv - uy \Rightarrow Q\left(\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}\right) = xy - yx = 0$
- התבנית הסטנדרטית:

$$f\left(\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix}\right) = xu + yv \Rightarrow Q_f\left(\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}\right) = x^2 + y^2$$

סימון 9. עבור תבנית בילינארית f על V , נגדיר את $\hat{f}(u, v) = f(v, u)$

אם f סימטרית נבחין ש- $Q_f = Q_{\hat{f}}$

משפט 97 (שחזור תבנית בילינארית מתבנית ריבועית). תהי f תבנית בילי סימטרית על V , ונניח ש- $\text{char } \mathbb{F} \neq 2$, אז:

$$f(v, w) = \frac{Q_f(v+w) - Q_f(v) - Q_f(w)}{2} \quad 1.$$

2. אם f אינה תבנית ה-0 אז קיים $v \in V$ כך ש- $Q_f(v) \neq 0$.

הוכחה.

$$\begin{aligned} Q_f(v+w) - Q_f(v) - Q_f(w) &= f(v+w, v+w) - f(v, v) - f(w, w) \\ &= f(v, v) + f(v, w) \\ &\quad - f(w, v) + f(w, w) \\ &\quad - f(v, v) - f(w, w) \\ &\stackrel{\text{Sym}}{=} 2f(v, w) \end{aligned}$$

ובכך הוכחנו את 1. עתה נוכיח את 2. נניח $\forall v \in V: Q_f(v) = 0$ אז

$$\forall v, w \in V: f(v, w) = \frac{Q_f(v+w) - Q_f(v) - Q_f(w)}{2} = 0$$

אז

$$f\left(\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix}\right) = xv + yu \implies Q_f = 0 \wedge f \neq 0$$

■

הערה 30. אין ממש טעם להגדיר תבנית ריבועית על תבנית בי-לינארית שאיננה סימטרית. הסיבה? כל מטריצה יכולה להיות מפורקת לחלק סימטרי וחלק אנטי-סימטרי, החלק האנטי-סימטרי לא ישפיע על התבנית הריבועית (כי אלכסון אפס במטריצה המייצגת) ורק החלק הסימטרי ישאר בכל מקרה. זה לא שאי-אפשר, זה פשוט לא מעניין במיוחד.

6.4 ~ משפט ההתאמה של סילבסטר

משפט 98. נניח $\text{char } F \neq 2$, ו- f סימטרית על V . אז קיים בסיס ל- V הוא $B = (v_i)_{i=1}^n$ כך ש- $[f]_B$ אלכסונית. אם $\mathbb{F} = \mathbb{R}$, אז האיברים על האלכסון יהיו $\{1, -1, 0\}$ ולא רק $\{1, 0\}$.

תזכורת: $[f]_B$ סימון המוגדר בסיכום זה בלבד. בקורס מדברים על "המטריצה המייצגת של בי-לינארית" במילים מפורשות.

הוכחה. באינדוקציה על n . בסיס $n = 1$ ברור. אם f תבנית 0 , אז כל בסיס שנבחר מתאים. אחרת, קיים $v \in V, v \neq 0$ כך ש- $Q_f(v) \neq 0$. נגדיר $U = \{u \in V \mid f(u, v) = 0\}$. תמ'ו כי גרעין של ה"ל (כי קיבענו את v). מה התמונה של ההעתקה? $f(v, v) = Q_f(v) \neq 0$. לכן תמונת ההעתקה היא כל \mathbb{F} , וממדה 1. ידוע U תמ'ו מממד $n - 1$. אז $f|_U: U \times U \rightarrow \mathbb{F}$ לכסינה ולכן קיים בסיס B_U כך ש- $[f|_U]$ אלכסונית. נגדיר את $B = \{v\} \cup B_U$ נבחין שהיא מהצורה:

$$\begin{pmatrix} * & 0 & \cdots \\ 0 & [f|_U]_B & - \\ \vdots & | & \end{pmatrix}$$

■

משפט 99. לכל f תבנית סימטרית קיימת מטריצה מייצגת מהצורה $\begin{pmatrix} I_r & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$ כאשר $\mathbb{F} = \mathbb{C}$ (או סגור אלגברית כלשהו). אינטואיציה להוכחה. ננרמל את המטריצה, נבחין שחלוקה ב- c של השורה ה- i ניאליץ להפעיל גם עם העמודה ה- i , כלומר את $a_{i,i}$ נחלק ב- c^2 בצורה הזו (זאת כי כאשר $P^T A P$ הגדרת חפיפה, ו- P מדרגת שורות, P^T מדרגת עמודות).

הוכחה. נסמן את $\dim f = r$. עד כדי שינוי סדר איברי הבסיס, המטריצה המייצגת אלכסונית היא:

$$[f]_B = \begin{pmatrix} \text{diag}(c_1 \dots c_r) & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$$

כאשר $c_1 \dots c_r \neq 0$, ביחס לבסיס $B = (v_1 \dots v_r, \dots v_n)$. באופן כללי לכל $i \in \mathbb{R}$ נוכל להגדיר את $v'_i = \frac{v_i}{\sqrt{c_i}}$ כך ש- $f(v'_i, v'_i) = 1$ כי $f(v_i, v_i) = c_i$ ומליניאריות בכל אחת מהקורדינאטות. בשל כך $B' = (v'_1 \dots v'_r, v_{r+1} \dots v_n)$ בסיס המקיים את הדרוש.

באותו האופן, אם $\mathbb{F} = \mathbb{R}$ (ולא \mathbb{C}) אז קיים בסיס שהמטריצה המייצגת לפיו היא:

$$\begin{pmatrix} I_p & 0 & 0 \\ 0 & -I_q & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

בלוקים, כך ש- $p + q = r$. כאן נגדיר:

$$f(v, v) = c < 0, \quad v' = \frac{v}{\sqrt{|c|}}, \quad f(v', v') = \frac{c}{|c|} = -1$$

■

הגדרה 65. יהי V מ"ו מעל \mathbb{R} ו- f תבנית בי-לינארית מעל V . נאמר ש- f חיובית/אי-שלילית/שלילית/אי-חיובית אם $\forall 0 \neq v \in V$ מתקיים ש- $0 < f(v, v) < 0 / f(v, v) \leq 0 / f(v, v) > 0 / f(v, v) \geq 0$.

משפט 100. תהא A מטריצה מייצגת של תבנית בי-ליניארית סימטרית, עם ערכים $0, -1, 1$ בלבד על האלכסון, מקיימת:

• f חיובית אמ"מ ישנם רק 1-ים.

- f אי-שלילית אמ"מ ישנם רק 1-ים ואפסים.
- f שלילית אמ"מ ישנם רק 1-ים.
- f חיובית אמ"מ ישנם רק 1-ים ואפסים.

הוכחה.

← טריוויאלי

⇒ לכל $v \in V$, $0 \neq v$ קיימים ויחידים $\alpha_1 \dots \alpha_n \in \mathbb{R}$ כך ש- $v = \sum_{i=1}^n \alpha_i v_i$ ומתקיים $f(v, v) = \alpha_i^2 f(v_i, v_i)$ ולפי המקרה זה יסתדר יפה.

■

משפט 101 (משפט ההתאמה של סילבסטר). p, q הנ"ל נקבעים ביחידות.

(תחזרו כמה משפטים למעלה במקרה בו $\mathbb{F} = \mathbb{R}$)

גישה שגויה להוכחה. הוכחה באמצעות tr לא עובדת. בניגוד ליחס הדמיון להעתקות לינאריות, ביחס החפיפה להעתקות בי-לינאריות ה- tr לא נשמר.

■

הוכחה תקינה. נסמן $B = (v_1 \dots v_p, u_1 \dots u_q, w_1 \dots w_k)$ וכן $B' = (v'_1 \dots v'_t, u'_1 \dots u'_s, w_1 \dots w_k)$ כי $t + s = p + q$. בה"כ $t \leq p$, נניח בשלילה ש- $t < p$. נסמן $U = \text{span}(v_1 \dots v_p)$. ידוע f חיובית על U , וכן $\dim U = p$. נתבונן ב- $W = \text{span}(u'_1 \dots u'_s, w_1 \dots w_k)$. אזי גם f חיובית על W , ו- $\dim W = s + k$. בגלל ש- $U \cap W = \{0\}$ (כי אם לא, אז עבור $0 \neq v \in U \cap W$ נקבל $0 < f(v, v) > 0$ כי $v \in U$ וכן $f(v, v) \leq 0$ כי $v \in W$ וסתירה). ידוע ש- $U \oplus W \subseteq V$ תמ"ו וכן $\dim U + \dim W \leq \dim V$. נציב ונקבל $p + s + k > t + s + k = \dim V$. סתירה. לכן p, q נקבעים ביחידות.

■

סימון 10. ה- (p, q) לעיל נקראים הסינגטורה של f .

(תזהרו, הסינגטורה תתקוף אותנו אח"כ)

המשך בעמוד הבא

Inner Product Vector Spaces 7

7.1 ~ הגדרה כללית

7.1.1 מעל \mathbb{R}

מענה ועד סוף הקורס, מתקיים $\mathbb{F} = \mathbb{R}, \mathbb{C}$. כל עוד נאמר "F", זה נכון בעבור שני המקרים. אחרת, נפצל.

הגדרה 66. יהי V מ"ו, מכפלה פנימית מעל \mathbb{R} היא תבנית בי-לינארית סימטרית חיובית מעל V , ומסומנת $f(v, u) = \langle v, u \rangle$ ויש ספרים שמסמנים $\langle \cdot | \cdot \rangle : V \times V \rightarrow \mathbb{R}$.

סימון 11. בקורס מסמנים $\langle \cdot, \cdot \rangle$ אבל אני מגניב אז אני משתמש ב- $\langle \cdot | \cdot \rangle$.

למה 9. $\langle v | v \rangle \geq 0 \quad \forall v \in V$ ו- $\langle v, v \rangle = 0$ אם ורק אם $v = 0$.

הוכחה מסימטריות.

דוגמה. (המכפלה הפנימית הסטנדרטית על \mathbb{R}^n , AKA כפל סקלרי):

$$\left\langle \begin{pmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix} \middle| \begin{pmatrix} y_1 \\ \vdots \\ y_n \end{pmatrix} \right\rangle = \sum_{i=1}^n x_i y_i$$

הגדרה 67. אם V מ"ו וקיימת $\langle \cdot | \cdot \rangle : V \times V \rightarrow \mathbb{F}$ מכפלה פנימית אז $(V, \langle \cdot | \cdot \rangle)$ נקרא מרחב מכפלה פנימית, ממ"פ.

משפט 102. $V = M_n(\mathbb{R})$, אז $\langle A | B \rangle = \text{tr}(A \cdot B^T)$ אז $(V, \langle \cdot | \cdot \rangle)$ ממ"פ.

דוגמה מגניבה. בהינתן $V = [0, 1]$, מ"ו הפונקציות הממשיות הרציפות על $[0, 1]$, ו- $\langle f | g \rangle = \int_0^1 f(x) \cdot g(x) dx$.

משפט 103. (שהפליצו מחדו"א) אם $f \geq 0$ אינטרבילית על קטע $[a, b]$ וגם ישנה נקודה חיובית $c \in [a, b]$ שעבורה $f(x) \geq 0$ וגם $\int_a^b f(x) dx > 0$, אז c רציפה ב- c .

7.1.2 מעל \mathbb{C}

ישנה בעיה עם חיוביות: אם $v \in V$ כך ש- $\langle v | v \rangle \geq 0$ אך $\langle iv | iv \rangle = -1 \langle v | v \rangle < 0$ סתירה. לכן, במקום זאת, נשתמש בהגדרה הבאה:

הגדרה 68. יהי V מ"ו מעל \mathbb{C} . מכפלה פנימית $\langle \cdot | \cdot \rangle : V \times V \rightarrow \mathbb{C}$ מקיימת:

- ליניאריות ברכיב הראשון: אם נקבע v , אז $u \mapsto \langle v | u \rangle$ לינארית.
- סקווי-לינאריות/אנטי-לינאריות ברכיב השני (במקום לינאריות): $\langle u | \alpha v \rangle = \alpha \langle u | v \rangle$
- כאשר $\bar{\alpha}$ הצמוד המרוכב של α .
- הרמטיות (במקום סימטריות): $\langle v | u \rangle = \overline{\langle u | v \rangle}$
- חיוביות ואנאיזוטרופיות: $\forall 0 \neq v \in V: \langle v | v \rangle > 0 \wedge \langle 0 | 0 \rangle = 0$

למעשה – נבחין שאין צורך בממש סקווי-לינאריות ברכיב השני וכן לא בתנאי $\langle 0 | 0 \rangle = 0$, וההגדרה שקולה בעבור חיבוריות ברכיב השני בלבד, זאת כי:

$$\langle u | \alpha v \rangle = \overline{\langle \alpha v | u \rangle} = \overline{\alpha \langle v | u \rangle} = \bar{\alpha} \cdot \overline{\langle v | u \rangle} = \bar{\alpha} \langle v | u \rangle = \bar{\alpha} \langle v | u \rangle$$

ומכאן נגרר סקווי-לינאריות, וכן $\langle 0 | 0 \rangle = 0$ נובע ישירות מלינאריות ברכיב השני.

הערה 31. באוניברסיטאות אחרות מקובל להגדיר לינאריות ברכיב השני ולא בראשון. זה לא באמת משנה.

הגדרה 69. $\overline{B^T} = B^*$

הגדרה 70 (הגדרה נחמדה). יהי ממ"פ V מעל \mathbb{F} . לכל $v \in V$ מגדירים את הנורמה של v להיות $\|v\| = \sqrt{\langle v | v \rangle}$.

משפט 104. הנורמה כפלית וחיובית.

הוכחה. מאקסיומת החיוביות:

$$\|v\| \geq 0 \wedge (\|v\| = 0 \iff v = 0)$$

וכן:

$$\|t \cdot v\| = \langle tv | tv \rangle = t\bar{t} \langle v | v \rangle = |t| \|v\| \implies \|t \cdot v\| = |t| \cdot \|v\|$$

■

הגדרה 71. יהי V מ"ו מעל \mathbb{F} , ו- $\|\cdot\| : V \rightarrow \mathbb{R}_{\geq 0}$ אז $(V, \|\cdot\|)$ יקרא מרחב נורמי.

משפט 105. ("נוסחת הפולריציה") בהינתן $(V, \|\cdot\|)$ מרחב נורמי, ניתן לשחזר את המכפלה הפנימית, באמצעות הנוסחה הבאה:
גרסה מעל \mathbb{R} :

$$\forall v, u \in V: \langle v | u \rangle = \frac{1}{4}(\|u+v\|^2 + \|u-v\|^2)$$

גרסה מעל \mathbb{C} :

$$\langle u | v \rangle = \frac{1}{4} \left(\|u+v\|^2 - \|u-v\|^2 + i\|u+iv\|^2 - i\|u-iv\|^2 \right)$$

הוכחה (ל- \mathbb{C}).

$$\begin{aligned} \langle u+v | u+v \rangle &= \|u\|^2 + \langle u | v \rangle + \langle v | u \rangle + \|v\|^2 \\ &= \|u\|^2 + \|v\|^2 + 2\Re(\langle v | u \rangle) \\ \langle v-u | v-u \rangle &= \|u\|^2 + \|v\|^2 - 2\Re(\langle v | u \rangle) \\ \langle u+iv | u+iv \rangle &= \|u\|^2 + \|v\|^2 + \langle u | iv \rangle + \langle iv | u \rangle \\ &= \|u\|^2 + \|v\|^2 - i\langle u | v \rangle + i\overline{\langle u | v \rangle} \\ &= \|u\|^2 + \|v\|^2 - i(2\Im \langle u | v \rangle) \\ \|u-iv\| &= \|u\| + \|v\| - \langle u | iv \rangle - \langle iv | u \rangle \\ &= \|u\| + \|v\| - 2\Im(\langle v | u \rangle) \end{aligned}$$

■ וסה"כ אם נציב בנוסחה, אחרי שחישבנו את כל אבירה, הכל יצטמצם ו- $\langle u | v \rangle$ אכן שווה לדרוש.

במילים אחרות, באותה המידה שתבניות שמתבניות בי-לינאריות ותבניות ריבועיות אפשר להסיק אחת מהשניה, אפשר גם ממכפלה פנימית להסיק נורמה ולהפך. אזי, ממ"פ ומרחב נומרי הם די שקולים.

7.2 ~ אורתוגונליות

הגדרה 72. בהינתן $(v, \langle \cdot | \cdot \rangle)$ ממ"פ, לכל $v \in V$ נאמר ש- u מאונך ל- v (או אורתוגונלי ל- v אם אנחנו מרגישים מפונפנים) ונסמן $u \perp v$ אם $\langle u | v \rangle = 0$.

הערה 32. אם $u \perp v$ אז $v \perp u$. (כי צמוד של 0 הוא 0).

7.2.1 משפט פיתגורס ותוצאותיו

משפט 106 (משפט פיתגורס). (מאוד מועיל) יהי V ממ"פ כך ש- $v, u \in V$ אורתוגונלים, אז $\|v+u\|^2 = \|v\|^2 + \|u\|^2$

הוכחה. משום שהם מאונכים מתקיים $\langle v | u \rangle = 0$. נפתח אלגברה:

$$\|v+u\|^2 = \langle v+u | v+u \rangle = \|v\|^2 + \cancel{\langle v | u \rangle} + \cancel{\langle u | v \rangle} + \|u\|^2 = \|v\|^2 + \|u\|^2 \quad \top$$

■

הערה 33. בתוך \mathbb{R}^n הוקטורים הסטנדרטיים מאונכים אחד לשני (במכפלה הפנימית הסטנדרטית) ולכן $\langle e_i | e_j \rangle = \delta_{ij}$ כאשר δ_{ij} הדלתא של קרונקר. באינדוקציה על משפט פיתגורס נקבל ש-:

$$v = \sum_{i=1}^n \alpha_i e^i \implies \|v\| = \sum_{i=1}^n \alpha_i^2$$

שה בדיוק מושג הגודל בגיאומטריה אוקלידית.

הערה 34. מעל \mathbb{R} מקבלים אמ"מ למשפט פיתגורס, מעל \mathbb{C} לא דווקא.

משפט 107. (אי שוויון קושי-שוורץ)

$$\forall v, u \in V: |\langle u | v \rangle| \leq \|u\| \cdot \|v\|$$

ושוויון אמ"מ u, v ת"ל.

הוכחה. אם v או u הם 0, אז מתקבל שוויון. טענת עזר: קיים איזשהו $\alpha \in \mathbb{F}$ כך ש- $u - \alpha v \perp v$. נסמן $v_u = \alpha v$ כאשר נמצא אותו. הוכחת טענת העזר. נחפש כזה:

$$\langle u - \alpha v | v \rangle = 0 \iff \langle v | u \rangle - \alpha \|v\|^2 = 0 \iff \alpha = \frac{\langle v | u \rangle}{\|v\|^2}$$

כדרוש. (מותר לחלק בנורמה כי הם לא 0). ניעזר במשפט פיתגורס:

$$\begin{aligned} & \begin{cases} u - \alpha v \perp v \\ u - \alpha v \perp v \end{cases} \\ \implies \|u\|^2 &= \|(u - \alpha v + \alpha v)\|^2 = \overbrace{\|u - \alpha v\|^2}^{\geq 0} + |\alpha|^2 \|v\|^2 \\ &\geq |\alpha| \cdot \|v\|^2 = \frac{|\langle v | u \rangle|^2}{(\|v\|^2)^2} = \|v\|^2 = \frac{|\langle u | v \rangle|^2}{\|v\|^2} \\ \implies |\langle v | u \rangle|^2 &\leq \|v\| \cdot \|u\| \end{aligned}$$

■ בפרט $\|u - \alpha v\|^2 = 0$ אם"מ הם תלויים לינארית ומכאן הכיוון השני של המשפט.

הערה 35. זה לא מדויק להגיד שזה נגרר ממשפט הקוסינוסים מעל \mathbb{R}^n , משום שהגדרת הזווית בין u, v בגיאומטריה האוקלידית מבוצעת כדלקמן:

$$\theta_{u,v} := \arccos \frac{\langle u | v \rangle}{\|u\| \|v\|}$$

דוגמאות.

1. ממכפלה פנימית סטנדרטית:

$$\left| \sum_{i=1}^n \alpha_i \beta_i \right|^2 \leq \left(\sum_{i=1}^n \alpha_i^2 \right) \left(\sum_{i=1}^n \beta_i^2 \right)$$

2. נניח $f, g: [0, 1] \rightarrow \mathbb{R}$ רציפות אז:

$$\left| \int_0^1 f(t)g(t) dt \right|^2 \leq \int_0^1 f^2(t) dt \cdot \int_0^1 g^2(t) dt$$

כאשר $f^2 = f \cdot f$ (לא הרכבה).

3. אי-שוויון המשולש:

$$\forall u, v \in V: \|u + v\| \leq \|u\| + \|v\|$$

ושוויון אם"מ אחד מהם הוא 0 או אם הם כפולה חיובית אחד של השני (לא שקול לתלויים לינארית - יכולה להיות כפולה שלילית).

הוכחה (לאי שוויון המשולש). תזכורת: עבור $Z \in \mathbb{C}$ מתקיים $|Z|^2 = (\Re Z)^2 + (\Im Z)^2$

$$\|u + v\|^2 = \|u\|^2 + \|v\|^2 + 2\Re(\langle u | v \rangle) \leq \|u\|^2 + \|v\|^2 + 2|\langle u | v \rangle|$$

ושוויון אם"מ u הוא אפס או כפולה חיובית של v . מקושי-שוורץ:

$$\leq \|u\|^2 + 2\|u\|\|v\| + \|v\|^2 = (\|u\| + \|v\|)^2$$

■

7.3 ~ מרחבים ניצבים והיטלים

סימון 12. יהי $(V, \langle \cdot | \cdot \rangle)$ ממ"פ. יהיו $S, T \subseteq V$. נסמן:

א. $u \in V: (u \perp S \iff (\forall v \in S: u \perp v))$

ב. $S \perp T \iff \forall v \in S \forall u \in T: v \perp u$

ג. $S^\perp := \{v \in V \mid v \perp S\}$

הגדרה 73. T^\perp הוא תת-המרחב הניצב ל- T .

משפט 108. יהיו $S, T \subseteq V$ קבוצות, ו- $U, W \subseteq V$ תמ"וים. אז:

א. $v \perp \text{span}(S)$ אם ורק אם $v \perp S$

ב. $S^\perp \subseteq V$ תמ"ו

ג. אם $S \subseteq T$ אז $T^\perp \subseteq S^\perp$

ד. $U \oplus U^\perp = V$

ה. $(S^\perp)^\perp = \text{span } S$

ו. $(U + W)^\perp = U^\perp \cap W^\perp$

ז. $(U \cap W)^\perp = U^\perp + W^\perp$

הוכחה (לג').

$$\forall v \perp T: v \perp S \implies v \in S^\perp$$

■

הערה 36. שוויון בג' מתקיים אם ורק אם $\text{span } S = \text{span } T$.

הגדרה 74. משפחה של וקטורים $A \subseteq V$ נקראת אורתוגונלית אם $u \perp v$ $\forall u \neq v \in A$

הערה 37. אם A משפחה אורתוגונלית וגם $0 \notin A$ אז ניתן לייצור ממנה משפחה של וקטורים אורתוגונלים שהם גם וקטורי יחידה, ע"י נרמול.

הגדרה 75. משפחה של וקטורים $A \subseteq V$ נקראת אורתונורמלית, אם היא אורתוגונלית ובנוסף כל הוקטורים הם וקטורי יחידה.

הגדרה 76. יהי $U \subseteq V$ תמ"ו. יהא $v \in V$. אז ההטלה האורתוגונלית של v על U היא $p_U(v)$ הוא וקטור המקיים:

$$p_U(v) \in U \quad \bullet$$

$$v - p_U(v) \in U^\perp \quad \bullet$$

משפט 109. בסימונים לעיל, $\forall u \in U: \|v - u\| \geq \|v - p_U(v)\|$ ושוויון אם ורק אם $u = p_U(v)$.

הוכחה. יהי $u \in U$. ידוע $p_U(v) \in U$. אזי $u - p_U(v) \in U$. כמו כן ידוע $u \perp v - p_U(v)$. אזי בפרט $\langle u - p_U(v) | p_U(v) - v \rangle = 0$. נתבונן ב-:

$$\|u - v\|^2 = \|(u - p_U(v)) + (p_U(v) - v)\|^2 \stackrel{\text{פיט}}{=} \|u - p_U(v)\|^2 + \|v - p_U(v)\|^2$$

■

וסה"כ $\|v - u\|^2 \geq \|v - p_U(v)\|^2$. ושוויון אם ורק אם $\|u - p_U(v)\| = 0$ אם ורק אם $u = p_U(v)$.

עתה נוכיח את יחידות ההטלה האורתוגונלית (קיום נוכיח בהמשך באופן קונסטקרטיווי)

משפט 110. ההטלה הניצבת, היא יחידה.

הוכחה. יהיו $p_U(v)$ וכן $p'_U(v)$ הטלות של v על U . מהטענה:

$$\|v - p_U(v)\| \leq \|v - p'_U(v)\|$$

■

אבל בהחלפת תפקידים מקבלים את אי-השוויון ההפוך. לכן יש שוויון נורמות. מהמשפט לעיל $p_U(v) = p'_U(v)$.

משפט 111. תהי $A \subseteq V$ משפחה אורתוגונלית ללא 0. אז היא בת"ל.

הוכחה. יהיו $v_1 \dots v_n \in A$ וכן $\alpha_1 \dots \alpha_n \in \mathbb{F}$, כך ש- $\sum_{i=1}^n \alpha_i v_i = 0$. יהי $i \in [n]$. אז:

$$0 = \langle 0 | v_j \rangle = \left\langle \sum_{i=1}^n \alpha_i v_i \middle| v_j \right\rangle = \sum_{i=1}^n \alpha_i \langle v_i | v_j \rangle = \alpha_j \underbrace{\|v_j\|^2}_{\neq 0} \implies \alpha_j = 0$$

■

כאשר השוויון האחרון מהיות הקבוצה אורתוגונלית.

משפט 112 (קיום היטל אורתוגונלי). נניח ש- $u \in V$ תמ"ו. נניח U נ"ס וכן $B = (e_1 \dots e_n)$ בסיס אורתונורמלי של U (כלשהם, לא בהכרח סטנדרטיים כי גם לא בהכרח \mathbb{F}^n). אז

$$\forall v \in V: p_U(v) = \sum_{i=1}^n \langle v | e_i \rangle e_i$$

הוכחה. צל. $p_U(v) \in U$ וגם $\forall u \in U: \langle v - p_U(v) | u \rangle = 0$ אך לגבי התנאי האחרון די להוכיח $\langle v_i p_U(v) | e_j \rangle = 0$. החלק הראשון ברור, נותר להוכיח:

$$\langle v - p_U(v) | e_j \rangle = \langle v | e_j \rangle - \langle p_U(v) | e_j \rangle =: *$$

ידוע:

$$\langle p_U(v) | e_j \rangle = \left\langle \sum_{i=1}^m \langle v | e_i \rangle e_i \middle| e_j \right\rangle = \sum_{i=1}^m \langle v | e_i \rangle \cdot \langle e_i | e_j \rangle = \sum_{i=1}^m \langle v | e_i \rangle \delta_{ij} = \langle v | e_j \rangle$$

נחזור לשוויון לעיל:

$$* = \langle v | e_j \rangle - \langle v | e_j \rangle = 0$$

■

כדרוש.

(בכך הוכחנו את קיום $p_U(v)$ לכל מ"ו נ"ס, אם נשלב את זה עם המשפט הבא)

7.3.1 אלגוריתם גרהם-שמידט

משפט 113 (אלגוריתם גרהם-שמידט). תהי $(b_1 \dots b_k)$ קבוצה סדורה בת"ל של וקטורים בממ"ס V . אז בכל משפחה א"נ $\text{span}(b_1 \dots b_k) = \text{span}(u_1 \dots u_k)$ כך ש- $(u_1 \dots u_k)$

מסקנות מהמשפט. לכל ממ"ס נ"ס קיים בסיס א"נ (=אורתונורמלי). יתרה מזאת, בהינתן בסיס $B = (b_1 \dots b_n)$ ניתן להופכו לבסיס א"נ $(u_1 \dots u_n)$ המקיים $\forall k \in [n]: \text{span}(b_1 \dots b_k) = \text{span}(u_1 \dots u_k)$.

הוכחה. בנייה באינדוקציה. נגדיר עבור $k = 1$ את $u_1 = b_1'$. מתקיים $\text{span } u_1 = \text{span } b_1$ וכן $\{u_1\}$ קבוצה א"נ. נניח שבנינו את k האיברים הראשונים, נבנה את האיבר ה- $k+1$ (כלומר את u_{k+1}). במילים אחרות, הנחנו $u_1 \dots u_k$ אורתונורמלית וגם $\text{span}(u_1 \dots u_k) = \text{span}(b_1 \dots b_k) = U$.

מהסעיף הקודם $p_U(b_{k+1})$ קיים, וגם $b_{k+1} - p_U(b_{k+1}) \neq 0$ נגדיר $u_{k+1} = (b_{k+1} - p_U(b_{k+1}))$. בצורה מפורשת:

$$u_{k+1} = \frac{b_{k+1} - \sum_{i=1}^k \langle b_{k+1} | u_i \rangle u_i}{\left\| b_{k+1} - \sum_{i=1}^k \langle b_{k+1} | u_i \rangle u_i \right\|}$$

מהגדרת $p_U(b_{k+1})$ מתקיים $b_{k+1} - p_U(b_{k+1}) \in U^\perp$ ולכן גם $u_{k+1} \in U^\perp$ ולכן $(u_1 \dots u_{k+1})$ משפחה א"נ.

$$b_1 \dots b_k = \overbrace{\text{span}(u_1 \dots u_{k+1})}^{\text{בת"ל}}$$

נשאר להוכיח ש- $b_{k+1} \in \text{span}(u_1 \dots u_{k+1})$. זה מספיק משום שאז נקבל $\text{span}(b_1 \dots b_{k+1}) \subseteq \text{span}(u_1 \dots u_{k+1})$. אבל הם שוי ממד ולכן שווים. סה"כ:

$$b_{k+1} = \|b_{k+1} - p_U(b_{k+1})\| \cdot u_{k+1} + \sum_{i=1}^k \langle b_{k+1} | u_i \rangle u_i \implies b_{k+1} \in \text{span}(u_1 \dots u_{k+1})$$

■

מש"ל.

משפט 114. יהי V מ"ו $U \subseteq V$. נניח שלכל $v \in V$ מוגדר $p_U(v)$ (בפרט כל מ"ו נ"ס). אז $p_U: V \rightarrow V$ המוגדרת לפי $v \mapsto p_U(v)$ העתקה לינארית.

הוכחה. יהיו $v, v' \in V, \alpha \in \mathbb{F}$. ידוע $v - p_U(v), v' - p_U(v') \in U^\perp$ ועל כן:

$$(v - p_U(v)) + \alpha(v' - p_U(v')) \in U^\perp \implies (v + \alpha v') - (p_U(v) + \alpha p_U(v')) \in U^\perp \implies (v + \alpha v') - p_U(v + \alpha v') \in U^\perp$$

מה מקיים היטל וקטור? ראשית ההיטל ב- U , ושנית v פחות ההיטל מאונך. הוכחנו שבהינתן היטל, הוא יחיד. והראינו ש- $(v + \alpha v') - p_U(v + \alpha v')$ מקיים את זה, ולכן אם יש וקטור אחד אז הוא יחיד, וסה"כ שווים ולינארית. ■

משפט 115. $\min_{u \in U} \|v - u\| = \|v - p_U(v)\|$

בניסוח אחר: ההיטל $p_U(v)$ הוא הוקטור הכי קרוב ל- v ב- U . בתרגול צוין שזוהי דרך למצוא את הפתרון "הכי קרוב" למערכת משוואות לינארית שאין לה פתרון.

הגדרה 77. הפתרון האופטימלי למערכת משוואות $(A | b)$ הוא $p_{\text{Col } A}(b)$ (כאשר $\text{Col } A$ מ"ו העמודות).

7.4 ~ צמידות

7.4.1 העתקה צמודה לעצמה

הגדרה 7.8. V ממ"פ ו- $T: V \rightarrow V$ ט"ל. אז T נקראת סימטרית ($\mathbb{F} = \mathbb{R}$) או הרפטית ($\mathbb{F} = \mathbb{C}$) אם $\langle Tu | v \rangle = \langle u | Tv \rangle$ $\forall u, v \in V$. באופן כללי, העתקה כזו תקרא צמודה לעצמה.

דוגמה. (המקרה בפרטי בממ"פ המשרה את הגיא' האוקלידית) עבור $V = \mathbb{R}^n$, $\langle \cdot | \cdot \rangle$ מ"פ סטנדרטית, ו- $A \in M_n(\mathbb{R})$ מתקיים $T_A: V \rightarrow V$ ט"ל, היא צמודה לעצמה אם: ידוע $\langle v | u \rangle = v^T u$:

$$\langle T_A v | u \rangle = (Av)^T u = v^T A^T u = \langle v | A^T u \rangle$$

ז"א אם $A = A^T$ אז T_A סימטרית, כלומר A מטריצה סימטרית. גם הכיוון השני נכון: אם $T: V \rightarrow V$ סימטרית אז ע"י בחירת בסיס נקבל $[T]_B^B$ גם היא סימטרית.

דוגמה נוספת (בדמות משפט)

משפט 116. ההעתקה $p_U(v) \mapsto v$ עבור U תמ"ו כלשהו, היא ההיטל, צמודה לעצמה.

משפט 117. העתקה סימטרית אמ"מ היא דומה למטריצה סימטרית.

משפט 118. יהיו $T, S: V \rightarrow V$ צמודות לעצמן. אז:

1. $\alpha T, T + S$ צמודות לעצמן.

2. המכפלה $S \circ T$ צמודה לעצמה אמ"מ $ST = TS$.

3. אם p פולינום מעל \mathbb{F} אז $p(T)$ צמודה לעצמה.

קל לראות ש- $3 \Rightarrow 1 + 2$. 1 נובע ישירות מהגדרה. 1 טריויאלי. נוכיח את 2.

הוכחה ל-2. נניח $S \circ T$ צמודה לעצמה. בהנחות המשפט ידוע S, T צמודות לעצמן. נקבל:

$$\langle (S \circ T)v | u \rangle = \langle v | STu \rangle = \langle Sv | Tu \rangle = \langle TSv | u \rangle \implies \langle (ST - TS)v | u \rangle = 0 \quad \forall v, u$$

נסיק:

$$\implies \forall v \langle (ST - TS)v | (ST - TS)v \rangle = 0 \implies (ST - TS)v = 0 \implies STv = TSv \implies \top$$

מהכיוון השני, אם $TS = ST$ אז מהיות S, T צמודות לעצמן:

$$\langle STv | u \rangle = \langle S(Tv) | u \rangle = \langle Tv | Su \rangle = \langle v | TSu \rangle = \langle v | STu \rangle$$

■

הגדרה 7.9. $T: V \rightarrow V$ תקרא חיובית/אי-שלילית/שלילית/אי-חיובית אם לכל $v \in V$:

$$\begin{array}{ll} \langle Tv | v \rangle \geq 0 & \text{חיובית: } \langle Tv | v \rangle > 0 \\ \langle Tv | v \rangle \leq 0 & \text{שלילית: } \langle Tv | v \rangle < 0 \\ \text{אי-שלילית: } \langle Tv | v \rangle \geq 0 & \\ \text{אי-חיובית: } \langle Tv | v \rangle \leq 0 & \end{array}$$

משפט 119. אם T חיובית/שלילית, אז היא הפיכה.

הוכחה. נניח ש- T לא הפיכה, נניח בשלילה שהיא חיובית. קיים $v \in V$, $v \neq 0$, אז $v \in \ker T$, אז $\langle 0 | v \rangle = 0$, $\langle Tv | v \rangle = 0$, בסתירה לכך ש- T חיובית. ■

משפט 120. נניח ש- S צמודה לעצמה, אז S^2 צמודה לעצמה ואי-שלילית.

הוכחה. ממשפט קודם S^2 צמודה לעצמה. נוכיח אי-שלילית:

$$\forall 0 \neq v \in V: \langle S^2 v | v \rangle = \langle Sv | Sv \rangle = \|Sv\|^2 \geq 0$$

■

הגדרה 80. פולינום $p \in \mathbb{R}[x]$ יקרא חיובי אם $p(x) > 0$ $\forall x \in \mathbb{R}$.

משפט 121. נניח $p(x) \in \mathbb{R}[x]$ חיובי, ו- $T: V \rightarrow V$ צמודה לעצמה, אז $p(T)$ חיובית גם-כן, וצמודה לעצמה.

למה 10. אם $p \in \mathbb{R}[x]$ אי-שלילי, אז קיימים $g_1 \dots g_k \in \mathbb{R}[x]$ וכן $0 \leq c \in \mathbb{R}$ כך ש- $p(x) = \sum_{i=1}^k g_i^2(x) + c$, ו- $c \neq 0$ אמ"מ p חיובי.

רעיון להוכחת הלמה: מעל \mathbb{C} זה מתפרק, ונוכל לכתוב $p(x) = a_n \prod_{j=1}^s (x - i\alpha_j)(x + i\alpha_j)$ (מעל \mathbb{R} כל פולינום מתפרק לגורמים ריבועיים, ואם כל שורשיו מרוכבים, כל גורמיו ריבועיים). הרעיון הוא להוכיח את הטענה ש- $g^2 h \bar{h} = g_1^2 + g_2^2$.

הוכחה (של המשפט, לא של הלמה). יהי $v \in V$ אז $0 \neq v$:

$$\langle p(T)v | v \rangle = \underbrace{\left\langle \sum_{i=1}^k g_i^2(T)v \mid v \right\rangle}_{\sum_{i=1}^k \langle g_i^2(T)v | v \rangle \geq 0} + \underbrace{c \|v\|^2}_{c \|v\|^2 > 0} \geq 0$$

■

מסקנה 18. אם $T: V \rightarrow V$ צמודה לעצמה ו- $p(x) \in \mathbb{R}[x]$ פולינום חיובי, אז $p(T)$ הפיכה.

משפט 122. נניח ש- $T: V \rightarrow V$ סימטרית (צמודה לעצמה מעל \mathbb{R} /המייצגת סימטרית) ויהי $m_T(x)$ הפולינום המינימלי של T . אז m_T מתפרק לגורמים לינאריים. בנוסף, הם שונים זה מזה.

הוכחה. נניח בשלילה קיום $p \mid m_T$ ו- $\deg p \geq 2$, p אי-פריק. בה"כ נניח ש- p חיובי (אין לו שורש ב- \mathbb{R} , לכן נמצא כולו מעל/מתחת לציר ה- x). אז אפשר לכתוב את m_T כ- $m_T = p \cdot g$ כלשהו. ידוע כי $p(T) \neq 0$ כי m_T מינימלי מדרגה גבוהה יותר. אז:

$$0 = m_T(T) = \underbrace{p(T)}_{\neq 0} \cdot g(T) \implies g(T) = 0$$

בסתירה למינימליות של m_T . סה"כ m_T אכן מתפרק לגורמים לינאריים. עתה יש להראות שהגורמים הלינאריים שלו זרים. נניח ש- T סימטרית. ניעזר בלמה המופיע מיד אחרי ההוכחה הזו. נניח בשלילה שהם לא כולם שונים, אז $m_T(x) = (x - \lambda)^2 g(x)$ ואז:

$$0 = m_T(T)v = (T - \lambda I)^2 g(T)v \implies \omega = g(T)v, (T - \lambda I)^2 \omega = 0$$

לכן בפרט $(T - \lambda I)\omega = 0$ מהסעיף הקודם. סה"כ $\forall v \in V: (T - \lambda I)g(T)v = 0$ וסתירה למינימליות.

מסקנה 19. T סימטרית היא לכסינה.

זכרו מסקנה זו להמשך. היא תהפוך להיות להגיוינית כאשר נדבר על המשפט הספקטרלי מעל \mathbb{R} .

למה 11. נניח T סמטרית ו- $\lambda \in \mathbb{R}$, אם $(T - \lambda I)^2 = 0$ אז $T - \lambda I = 0$

הוכחה. ידוע:

$$\forall v: 0 = \langle (T - \lambda I)^2 v | v \rangle = \langle (T - \lambda I)v | (T - \lambda I)v \rangle = \|(T - \lambda I)v\|^2 \implies (T - \lambda I)v = 0$$

■

משפט 123. אם V ממ"פ ו- $T: V \rightarrow V$ ט"ל צמודה לעצמה, אז הע"ע של T ממשיים.

הוכחה. יהי $0 \neq v \in V$ ו"ע של T שמתאים לע"ע λ . נחשב:

$$\lambda v \|v\|^2 = \langle \lambda v | v \rangle = \langle Tv | v \rangle = \langle v | Tv \rangle = \langle v | \lambda v \rangle = \bar{\lambda} \|v\|^2$$

ידוע $v \neq 0$ ולכן $\|v\| \neq 0$ ונסיק $\lambda v = \bar{\lambda} v$ ולכן $\lambda \in \mathbb{R}$.

משפט 124. אם V ממ"פ ו- $T: V \rightarrow V$ ט"ל צמודה לעצמה, אז כל זוג $0 \neq u, v \in V$ ע"ע שונים, המתאימים לערכים $\alpha, \beta \in \mathbb{C}$, מאונכים זה לזה.

הוכחה. למעשה, מהטענה הקודמת $\alpha, \beta \in \mathbb{R}$. כאן $Tu = \alpha u$, $Tv = \beta v$, נחשב:

$$\alpha \langle u | v \rangle = \langle \alpha u | v \rangle = \langle Tu | v \rangle = \langle u | Tv \rangle = \langle u | \beta v \rangle = \bar{\beta} \langle u | v \rangle = \beta \langle u | v \rangle$$

בגלל ש- $\beta \in \mathbb{R}$ מתקיים $\beta = \bar{\beta}$. ולכן $(\alpha - \beta) \langle u | v \rangle = 0$ מהעברת אגף וסה"כ $\langle u | v \rangle = 0$ ואכן $u \perp v$.

הערה 38. בחלק הבא יש שימוש קל במרחבים דואלים. בעבור סטונדטים שבעבורם מרחבים דואלים לא נכלל כחלק מלינארית 1א, אני ממליץ לקרוא את החלק הראשון של מרחבים דואלים בסוף הסיכום.

משפט 125 (משפט ריס). יהי V ממ"פ סופי ויהי $\varphi \in V^*$. אז קיים יחיד וקטור $u \in V$ שמקיים $\forall v \in V: \varphi(v) = \langle v | u \rangle$.

הוכחה.

קיום. יהי $B = (b_i)_{i=1}^n$ בסיס אורתונורמלי של V (הוכחנו קיום בהרצאות קודמות). נסמן $u = \sum_{i=1}^n \overline{\varphi(b_i)} b_i$. בכדי להראות $\forall v \in V: \varphi(v) = \langle v | u \rangle$ מספיק להראות תכונה זו לאברי הבסיס B , כלומר נראה ש- $\langle b_j | u \rangle = \varphi(b_j)$ $\forall 1 \leq j \leq n$: ואכן:

$$\langle b_j | u \rangle = \left\langle b_j \left| \sum_{i=1}^n \overline{\varphi(b_i)} b_i \right. \right\rangle = \sum_{i=1}^n \underbrace{\overline{\varphi(b_i)}}_{b_i} \underbrace{\langle b_j | b_i \rangle}_{\delta_{ij}} = b_j \quad \top$$

יחידות: אם קיים וקטור נוסף שעבורו $\forall v \in V: \varphi(v) = \langle v | w \rangle$ אז בפרט עבור $v = u - w$ נקבל:

$$\begin{aligned} \varphi(v) &= \langle v | w \rangle = \langle v | u \rangle \\ \implies \langle v | u - w \rangle &= 0 \\ \implies 0 &= \langle u - w | u - w \rangle = \|v - w\|^2 = 0 \\ \implies v - w &= 0 \\ \implies v &= w \end{aligned}$$

סה"כ הוכחנו קיום ויחידות כדרוש.

7.4.2 העתקה צמודה להעתקה

משפט 126. יהי V ממ"פ מנ"ס ותהי $T: V \rightarrow V$ לינארית. אז קיימת ויחידה $T^*: V \rightarrow V$ ומקיימת $\forall u, v \in V: \langle Tu | v \rangle = \langle u | T^*v \rangle$.

הוכחה. לכל $v \in V$, נתבונן בפונקציונל הלינארי $\varphi_v \in V^*$ המוגדר ע"י $\varphi_v(u) = \langle Tu | v \rangle$. $\forall u \in V$. ממשפט ריס קיים ויחיד $T^*v \in V$ שעבורו $\langle u | T^*v \rangle = \varphi_v(u) = \langle Tu | v \rangle$. כלומר, ההעתקה $T^*: V \rightarrow V$, קיימת ויחידה, ונותר להראות שהיא לינארית. עבור $v, w \in V$ ועבור $\alpha, \beta \in \mathbb{F}$ מתקיים:

$$\begin{aligned} \forall u \in V: \quad & \langle u | T^*(\alpha v + \beta w) \rangle \\ &= \langle Tu | \alpha v + \beta w \rangle \\ &= \alpha \langle Tu | v \rangle + \beta \langle Tu | w \rangle \\ &= \alpha \langle u | T^*v \rangle + \beta \langle u | T^*w \rangle \\ &= \langle u | \alpha T^*v + \beta T^*w \rangle \end{aligned}$$

מסך נסיק ש- $T^*(\alpha v + \beta w) = \alpha T^*v + \beta T^*w$ דומים.

הגדרה 81. ההעתקה T^* לעיל נקראת ההעתקה הצמודה ל- T .

דוגמאות. מעל \mathbb{C}^n , עם המ"פ הסטנדרטי, נגדיר ט"ל $T_A: \mathbb{C}^n \rightarrow \mathbb{C}^n$ עבור $A \in M_n(\mathbb{C})$ מוגדרת ע"י $T_A(x) = Ax$. אז:

$$\forall x, y \in \mathbb{C}^n: \langle T_A(x) | y \rangle = \langle Ax | y \rangle = \overline{(Ax)^T} \cdot y = \overline{x^T} \cdot \overline{A^T} y = \overline{x^T} T_{\overline{A^T}}(y) = \langle x | T_{\overline{A^T}} y \rangle$$

כלומר, $(T_A)^* = T_{\overline{A^T}}$ כאשר $A^* = \overline{A^T}$, וקראנו לה המטריצה הצמודה.

נבחין שהעתקה נקראת צמודה לעצמה אמ"מ $T^* = T$.

עוד נבחין שעבור העתקה הסיבוב $T: \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}^2$ בזווית θ , מתקיים ש- T^* היא הסיבוב ב- $-\theta$, וכן היא גם ההופכית לה. כלומר $(T_\theta)^* = T_{-\theta} = (T_\theta)^{-1}$. זו תכונה מאוד מועילה וגם נמצא לה שם במועד מאוחר יותר.

משפט 127 (תכונות ההעתקה הצמודה). יהי V ממ"פ ותהיינה $T, S: V \rightarrow V$ זוג העתקות לינאריות. נבחין ש-:

$$\begin{aligned} (T^*)^* &= T & (א) \\ (T \circ S)^* &= S^* \circ T^* & (ב) \\ (T + S)^* &= T^* + S^* & (ג) \\ \forall \lambda \in \mathbb{F}: (\lambda T)^* &= \bar{\lambda} (T^*) & (ד) \end{aligned}$$

הוכחה.

$$\forall u, v \in V: \langle T^*u | v \rangle = \overline{\langle v | T^*u \rangle} = \overline{\langle Tv | u \rangle} = \langle u | Tv \rangle \implies (T^*)^* = T \quad (א)$$

$$\langle (T \circ S)u | v \rangle = \langle Su | T^*v \rangle = \langle u | S^*T^*v \rangle \implies (TS)^* = T^*S^* \quad (ב)$$

$$\langle (T + S)u | v \rangle = \langle Tu | v \rangle + \langle Su | v \rangle = \langle u | T^*v \rangle + \langle u | S^*v \rangle = \langle u | T^*v + S^*v \rangle \quad (ג)$$

$$\langle (\lambda T)u | v \rangle = \lambda \langle Tu | v \rangle = \lambda \langle u | Tv \rangle = \langle u | (\bar{\lambda} T)v \rangle \quad (ד)$$

סימון 13. העתקה צמודה לעצמה לעיתים קרובות (בעיקר בפיזיקה) מסמנים ב- T^\dagger . באופן דומה גם מטריצה צמודה מסמנים ב- A^\dagger .

משפט 128. בהינתן B אורתונורמלי של V אז $[T^*]_B = [T]_B^*$ (שימו לב: האחד צמוד מטריציוני, והשני העתקה צמודה)

משפט 129. T צמודה לעצמה אם"מ \mathbb{R} $\langle Tv | v \rangle \in \mathbb{R} \forall v \in V$.

הוכחה.

$$\begin{aligned}
 & T \text{ צמודה לעצמה} \\
 \iff & T = T^* \iff T - T^* = 0 \\
 \iff & \forall v \in V: \langle (T - T^*)v | v \rangle = 0 \\
 \iff & \forall v \in V: \langle Tv | v \rangle - \langle T^*v | v \rangle = 0 \\
 \iff & \forall v \in V: \langle Tv | v \rangle - \overline{\langle Tv | v \rangle} = 0 \\
 \iff & \forall v \in V: \Re(\langle Tv | v \rangle) + \Im(\langle Tv | v \rangle) - \Re(\langle Tv | v \rangle) + \Im(\langle Tv | v \rangle) = 0 \\
 \iff & \forall v \in V: 2\Im(\langle Tv | v \rangle) = 0 \iff \forall v \in V: \Im(\langle Tv | v \rangle) = 0 \iff \forall v \in V: \langle Tv | v \rangle \in \mathbb{R} \quad \top
 \end{aligned}$$

■

המשך בעמוד הבא

8 Decompositions 8

אינטואיציה. ראינו לכסון – ניסיון למצוא מטריצה אלכסונית דומה. ה"בעיה" בלכסון, ובמטריצות מעבר באופן כללי, זה שהן לא משמרות את כל תכונות המרחב הוקטורי – הן לא משמרות את הנורמה. לכן, בחלק הזה של הקורס, נגדיר "מטריצות מעבר מיוחדות" שמשמרות נורמה, כלומר $\|Av\| = \|v\|$. בניסוח אחר, ננסה למצוא בסיס אורתונורמלי שבו הלכסון מתקיים. על התנאי הזה בדיוק נלמד כאשר נדבר על משפט הפירוק הספקטרי.

לצערנו, בדיוק כמו שלא יכולנו ללכסון כל מטריצה, נוכל ללכסן אורתונורמלית עוד פחות מטריצות. לכן, לאחר מכן נעסוק במושג "התאמת המטריצות" – בהינתן מטריצה A , נאמר שהיא מתאימה למטריצה B אם B קיימות מטריצות מעבר בסיסים P, Q כך ש- $A = PBQ^{-1}$. לכאורה, זה נראה תנאי חלש נורא. ואכן, אפשר להראות שהוא באמת חלש, ו- A מתאימה ל- B אם $\text{rank } A = \text{rank } B$. אך מסתבר שאם נגביל את B להיות אלכסונית, וממטריצות המעבר שלנו נדרוש לא לשנות את הנורמה (דהיינו $\|Bv\| = \|Av\| = \|v\|$), אז מצאנו פירוק מאוד משמעותי. לפירוק כזה נקרא "פירוק לערכים סינגולריים", והוא מאפשר לנו להגיד הרבה על ה"גדלים" שהמטריצה משנה, כי אנחנו מתאימים אותה למטריצה אלכסונית (שמאוד נוח לעבוד איתה) בעוד מטריצות המעבר לא באמת משפיעות על הנורמות של הדברים.

8.1 \sim המשפט הספקטרי להעתקות

8.1.1 ניסוח המשפט הספקטרי להעתקות צמודות לעצמן

משפט 130 (המשפט הספקטרי להעתקה לינארית צמודה לעצמה). יהי V ממ"פ מממד סופי, ותהי $T: V \rightarrow V$ ט"ל צמודה לעצמה. אז קיים ל- V בסיס אורתונורמלי (או אורתונורמלי) שמורכב מו"ע של T .

הוכחה. יהי $m_T(x)$ הפולינום המינימלי של T . נציג $m_T(x) = \prod_{i=1}^m (x - \lambda_i)^{d_i}$ כאשר $\lambda_1 \dots \lambda_n$ הע"ע השונים של T . מהטענה הקודמת $\lambda_1 \dots \lambda_n \in \mathbb{R}$. [הערה: התמשתנו במשפט היסודי של האלגברה מעל המרוכבים, והסקנו פירוק מעל \mathbb{R}]. בכדי להראות ש- T לכסינה, עלינו להוכיח ש- $\forall 1 \leq i \leq m: d_i = 1$. נניח בשלילה שזה לא מתקיים, אזי $m_T(x) = (x - \lambda)^2 \cdot p(x)$ כאשר λ ע"ע כלשהו. כעת, לכל $v \in V$ מתקיים מהיות T צמודה לעצמה (כלומר גם $p(T)$ צמוד לעצמו):

$$0 = \underbrace{m_T(T)}_{=0}(v) \implies 0 = \langle m_T(T)(v) | p(T)(v) \rangle = \langle (T - \lambda I)(p(T)v) | p(T)v \rangle = \langle (T - \lambda I)(p(T)v) | (T - \lambda I)(p(T)v) \rangle = \|(T - \lambda I)^2(p(T)v)\|^2 = 0$$

ולכן $\forall v \in V: (T - \lambda I)(p(T)v) = 0$ ולכן $((x - \lambda)p(x))(T) = 0$ בסתירה למינימליות של $m_T(x)$. נאמר, מכפלת גורמים לינארים שונים, ולכן T לכסינה, ונוכל לפרק את V באמצעות:

$$V = \bigoplus_{i=1}^m \ker(T - \lambda_i I)$$

והמרחבים העצמיים הללו אורתונורמליים זה לזה, מטענה שהוכחנו. נבנה בסיס $B_i \subseteq \ker(T - \lambda_i)$ וסה"כ $\bigcup_{i=1}^m B_i$ בסיס אורתונורמלי מלכסן של T . ■

משפט 131. יהי V נ"ס מעל \mathbb{R} ותהי $T: V \rightarrow V$ ט"ל. אז T צמודה לעצמה אם קיים לה בסיס אורתונורמלי מלכסן.

הוכחה. מכיוון אחד, הוכחנו באמצעות המשפט הספקטרי להעתקות לינאריות צמודות לעצמן. מהכיוון השני, נניח שקיים ל- V בסיס אורתונורמלי מלכסן של ו"ע של T . נרמל לבסיס אורתונורמלי $B = (b_i)_{i=1}^n$ של ו"ע של T , המתאימים ל- $\lambda_1 \dots \lambda_n$. עבור $v, u \in V$ נציג:

$$u = \sum_{i=1}^n \alpha_i b_i, \quad v = \sum_{i=1}^n \beta_i b_i$$

ונחשב:

$$\langle Tu | v \rangle = \left\langle T \left(\sum_{i=1}^n \alpha_i b_i \right) \middle| \sum_{i=1}^n \beta_i b_i \right\rangle = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \alpha_i \beta_j \langle T b_i | b_j \rangle = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \alpha_i \beta_j \lambda_i \underbrace{\langle b_i | b_j \rangle}_{\delta_{ij}} = \sum_{i=1}^n \alpha_i \beta_i \lambda_i$$

מהצד השני:

$$\langle u | Tv \rangle = \left\langle \sum_{i=1}^n \alpha_i b_i \middle| T \left(\sum_{i=1}^n \beta_i b_i \right) \right\rangle = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \alpha_i \beta_j \langle b_i | T b_j \rangle = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \alpha_i \beta_j \lambda_j \underbrace{\langle b_i | b_j \rangle}_{\delta_{ij}} = \sum_{i=1}^n \alpha_i \beta_i \lambda_i$$

מטרנזיטיביות שוויון, הראינו ש- $\langle Tu | v \rangle = \langle u | Tv \rangle$ ולכן T צמודה לעצמה. השוויון לדלתא של כקוניקר נכונה מאורתונורמליות איברי הבסיס, והבי-לינאריות כי אנחנו מעל הממשיים. המשפט לא נכון מעל מהרוכבים. ■

הוכחה שהמשפט לא נכון מעל המרוכבים: ההעתקה $T(x) = ix$ היא העתקה סקלרית לינארית, לכן כל וקטור הוא ו"ע וכל בסיס מלכסן, בסיס אורתונורמלי כלשהו יהיה בסיס מלכסן על אף שההעתקה לא צמודה לעצמה, אלא אנטי-הרמיטית.

8.1.2 ניסוח המשפט הספקטרי בעבור העתקה כללית

המטרה: להבין לאילו העתקות בדיוק מתקיים המשפט הספקטרי. מעל הממשיים, הבנו שאילו העתקות צמודות לעצמן. אז מה קורה מעל המרוכבים?

משפט 132. יהי V ממ"פ נ"ס ותהי $T: V \rightarrow V$ לינארית. אם $B = (b_i)_{i=1}^n$ בסיס אורתוגונלי ל"ע של T , אז $\forall 1 \leq i \leq n$ ו"ע של ההעתקה הצמודה.

כלומר: אם מתקיים המשפט הספקטרי, אז הבסיס שמלכסן אורתוגונלית את T מלכסן אורתוגונלית את הצמודה.

הוכחה. יהי $i \in [n]$ ונסמן בעבורו את λ_i הע"ע המתאים ל"ע b_i . עבור $i \neq j \in [n]$ נחשב את $\langle b_i | T^* b_j \rangle$:

$$\langle b_i | T^* b_j \rangle = \overline{\langle T b_i | b_j \rangle} = \overline{\langle \lambda_i b_i | b_j \rangle} = \lambda_i \langle b_i | b_j \rangle = 0$$

לכן $T^* b_j \in (\text{span}\{b_i\}_{i=1}^n)^\perp \stackrel{!}{=} \text{span}\{b_j\}$. משיקולי ממדים, הפריסה מממד $n-1$ ולכן המשלים האורתוגונלי שלו מממד 1 ולכן השוויון. סה"כ $T^* b_j \in \text{span}\{b_j\}$ ולכן b_j ו"ע של T^* כדרוש. ■

מסקנה. אם V ממ"פ נ"ס ו- $T: V \rightarrow V$ ט"ל עם בסיס מלכסן אורתוגונלי, אז T, T^* מתחלפות כלומר $TT^* = T^*T$.

הוכחה. לפי הטענה הקודמת כל b_i הוא ו"ע משותף ל- T ול- T^* , ולכן:

$$TT^*(b_i) = T(T^*(b_i)) = \beta_i T^*(b_i) = \beta_i \delta_i b_i = \alpha_i \beta_i b_i = \alpha_i T(b_i) = T^*T(b_i)$$

העתקה מוגדרת לפי מה שהיא עושה לבסיס ולכן $TT^* = T^*T$. ■

הגדרה 82. העתקה כזו המקיימת $AA^* = A^*A$ נקראת נורמלית (או "נורמלית" בעברית של שנות ה-60).

מענה ואילך, ננסה להראות שכל העתקה נורמלית מקיימת את התנאי של המשפט הספקטרי (כלומר ניתן ללכסנה אורתוגונלית)

משפט 133. (המשפט הספקטרי) יהי V ממ"פ נוצר סופית מעל \mathbb{C} , ותהי $T: V \rightarrow V$ לינארית. אז קיים בסיס אורתוגונלי של ו"ע של T אמ"מ נורמלית.

למה 12. יהי V ממ"פ ותהינה $S_1, S_2: V \rightarrow V$ זוג ט"ל צמודות ולעמן ומתחלפות (כלומר $S_1 S_2 = S_2 S_1$). אז קיים בסיס אורתוגונלי של V שמורכב מו"עים משופים ל- S_1 ול- S_2 .

הוכחה. ידוע ש- S_1 צמודה לעצמה, לכן לפי המשפט הספקטרי להעתקות צמודות לעצמן (לא מעגלי כי הוכח בנפרד בהרצאה הקודמת), קיים לה לכסון אורתוגונלי ובפרט S_1 לכסינה. נציג את V כ- $V = \bigoplus_{i=1}^m \ker(S_1 - \lambda_i I)$, כאשר $\lambda_1 \dots \lambda_m$ הע"עים השונים של S_1 . לכל $1 \leq i \leq m$ מתקיים ש- V_{λ_i} (המרחב העצמי) הוא S_1 -אינווריאנטי שהרי אם $v \in V_{\lambda_i}$ ונחשב:

$$S_1(S_2 v) = S_2(S_1 v) = S_2(\lambda_i v) = \lambda_i S_2 v \implies S_2 v \in V_{\lambda_i}$$

כאשר $S_2|_{V_{\lambda_i}}: V_{\lambda_i} \rightarrow V_{\lambda_i}$ צמודה לעצמה, ולכן המפשט הספקטרי לצמודות לעצמן אומר שבתוך V_{λ_i} ישנו בסיס אורתוגונלי של ו"עים מ- S_2 . האיחוד של כל הבסיסים הללו מכל מ"ע של S_1 יהיה בסיס אורתוגונלי של ו"עים משותפים ל- S_1 ול- S_2 . ■

הוכחת המשפט הספקטרי.

\implies לפי המסקנה הקודמת, אם ישנו לכסון אורתוגונלי T בהכרח נורמלית.

\Leftarrow נגדיר $S_1 = \frac{T+T^*}{2}$, $S_2 = \frac{T-T^*}{2i}$. הן וודאי צמודות לעצמן מהלינאריות וכל השטויות ממקודם, והן גם מתחלפות אם תטרוח להכפיל אותן. מהטענה קיים ל- V בסיס אורתוגונלי של ו"עים משותפים ל- S_1, S_2 ונסמנו $\{b_i\}_{i=1}^n$ וגם $S_1 b_i = \alpha_i b_i$, $S_2 b_i = \beta_i b_i$. אפשר גם לטעון ש- $\alpha_i, \beta_i \in \mathbb{R}$ אבל זה לא מועיל לנו. נשים לב ש- $T = S_1 + iS_2$, כלומר $\forall i \in [n]: T(b_i) = S_1(b_i) + iS_2(b_i) = \alpha_i b_i + i\beta_i b_i = (\alpha + i\beta_i)b_i$ וזהו בסיס אורתוגונלי של ו"עים של T . ■

למעשה, הבנו מהפירוק של S_1, S_2 ש- S_1 נותנת את החלק הממשי של הע"ע ו- S_2 את החלק המדומה.

"אגב - לא השתמשתי במשפט היסודי של האלגברה"

נסכם: יש לנו שתי גרסאות של המשפט הספקטרי:

משפט (המשפט הספקטרי מעל \mathbb{R}). T סימטרית אמ"מ קיים בסיס א"נ של ו"ע.

משפט (המשפט הספקטרי מעל \mathbb{C}). T נורמלית אמ"מ קיים בסיס א"נ של ו"ע.

משום שמטריצה הרמיטית (וצמודה לעצמה באופן כללי) היא בפרט נורמלית כי מטריצה מתחלפת עם עצמה, נסיק שלצמודה לעצמה קיים בסיס אורתוגונלי מלכסן (בעמוד הכיוון ההפוך לא נכון מעל המרוכבים, שם ההעתקה יכולה להיות נורמלית ולא סתם הרמיטית).

8.1.3 תוצאות ממשפט הפירוק הספקטרי

משפט 134. תהי $T: V \rightarrow V$ ט"ל, ו- V ממ"פ מעל $\mathbb{F} \in \{\mathbb{R}, \mathbb{C}\}$ ויהי B בסיס א"נ של V . אזי אם $A = [T]_B$:

$$[T^*]_B = A = ([T]_B)^*$$

הוכחה. נזכר ש-:

$$[T]_B = \begin{pmatrix} | & & | \\ [Te_1]_B & \cdots & [Te_n]_B \\ | & & | \end{pmatrix}$$

נסמן $B = \{e_i\}_{i=1}^n$ בסיס. נבחין ש-:

$$Te_j = \sum_{i=1}^n a_{ij} e_i, \quad a_{ij} = \langle Te_j | e_i \rangle$$

נסמן ב- C את המטריצה המייצגת $[T^*]_B$:

$$c_{ij} = \langle T^* e_j | e_i \rangle$$

ונחשב:

$$c_{ij} = \langle T^* e_j | e_i \rangle = \langle e_j | Te_i \rangle = \overline{\langle Te_i | e_j \rangle} = a_{ij}$$

■

מסקנה: אם A נורמלית אז T_A נורמלית מעל \mathbb{F}^n אם הסטנדרטית. בפרט מתקיים עליה המשפט הספקטרי. גם אם A ממשית, הע"ע עלולים להמצא מעל \mathbb{C} (אלא אם היא צמודה לעצמה, ואז הם מעל \mathbb{R}).

משפט 135. יהיו $x_1 \dots x_n, y_1 \dots y_n \in \mathbb{R}$. נניח $x_i \neq x_j \implies \forall i, j \in [n]: i \neq j \implies x_i \neq x_j$ אז $\exists! p \in \mathbb{R}_{\leq n-1}[x]: \forall i \in [n]: p(x_i) = y_i$ (באופן שקול: נניח p מתוקן)

הוכחה. ידוע שהפולינום מהצורה $p(x) = \sum_{k=0}^{n-1} a_k x^k = (1, x, x^2, \dots, x^{n-1})(a_0 \dots a_{n-1})^T$ למעשה, נקבל את מטריצת ונדרמונד:

$$\underbrace{\begin{pmatrix} 1 & x_1 & x_1^2 & \cdots & x_1^{n-1} \\ 1 & x_2 & x_2^2 & \cdots & x_2^{n-1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & x_n & x_n^2 & \cdots & x_n^{n-1} \end{pmatrix}}_V \underbrace{\begin{pmatrix} a_0 \\ a_1 \\ \vdots \\ a_{n-1} \end{pmatrix}}_a = \underbrace{\begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{pmatrix}}_y$$

וידוע שהדטרמיננטה של V היא מטריצת ונדרמונד היא $\prod_{i < j} (x_i - x_j)$, שאיננה אפס מההנחה ש- $x_i \neq x_j \forall i \neq j$, ולכן למערכת המשוואות $(V | y)$ קיים ויחיד פתרון, הוא a , שמגדיר באופן יחיד את מקדמי הפולינום.

אם $x_i = y_i$ בפולינום לעיל, אז $f \in \mathbb{R}[x]: f(\bar{a}) = \overline{f(a)} \implies f \in \mathbb{R}[x]$ הוכחה: נניח בשלילה, אז $\exists \alpha \in \mathbb{C} \setminus \mathbb{R}: f(\alpha) = 0$ אז $f(\bar{\alpha}) = \overline{f(\alpha)} = 0$ וזו סתירה. $f(\bar{\alpha}) = 0$ אז $f(\alpha) = 0$ וזו סתירה.

■

הערה 39. הפולינום שמקיים זאת נקרא פולינום לגראנג' והוא בונה אינטרפולציה די נחמדה אך יקרה חישובית. ניתן לחשב את הפולינום מפורשות באופן הבא:

$$p(x) = \sum_{i=1}^n \left(y_i \prod_{j=1}^n \frac{x - x_j}{x_i - x_j} \right)$$

משפט 136. תהי $A \in M_n(\mathbb{F})$ נורמלית, אז קיים פולינום $A^* = f(A)$ $\exists f(x) \in \mathbb{R}[x]: f(A) = B^*$ הוכחה: עבור A נורמלית מהמשפט הספקטרי קיים בסיס אורתונורמלי מלכסן ולכן קיימת P הפיכה כך ש- $P^{-1}AP = \text{diag}(\lambda_1 \dots \lambda_n)$ לכן $P^{-1}A^*P = \text{diag}(\bar{\lambda}_1 \dots \bar{\lambda}_n)$. נשתמש במשפט לפיו יש פולינום $f \in \mathbb{R}[x]$ כך ש- $f(x_i) = \bar{x}_i$ ובפרט בעבור $x_i = \lambda_i$ קיים פולינום עבורו $f(\lambda_i) = \bar{\lambda}_i$ אזי

הערה: באופן כללי התנאי ש- $f(A) = B^*$ $\exists f \in \mathbb{R}[x]: f(A) = B^*$ הזה מספיק אך לא הכרחי לכך ש- A, B מתחלפות.

הוכחה. עבור A נורמלית מהמשפט הספקטרי קיים בסיס אורתונורמלי מלכסן ולכן קיימת P הפיכה כך ש- $P^{-1}AP = \text{diag}(\lambda_1 \dots \lambda_n)$ לכן $P^{-1}A^*P = \text{diag}(\bar{\lambda}_1 \dots \bar{\lambda}_n)$. נשתמש במשפט לפיו יש פולינום $f \in \mathbb{R}[x]$ כך ש- $f(x_i) = \bar{x}_i$ ובפרט בעבור $x_i = \lambda_i$ קיים פולינום עבורו $f(\lambda_i) = \bar{\lambda}_i$ אזי

$$f(\text{diag}(\lambda_1 \dots \lambda_n)) = \text{diag}(f(\lambda_1) \dots f(\lambda_n)) = \text{diag}(\bar{\lambda}_1 \dots \bar{\lambda}_n)$$

$$f(P^{-1}AP) = P^{-1}f(A)P = P^{-1}A^*P \implies f(A) = A^*$$

■

עוד נבחין ש- $\deg f = n - 1$.

משפט 137. אם $T: V \rightarrow V$ נורמלית, אז $\exists f \in \mathbb{R}[x]: f(T) = T^*$.

הוכחה. נבחר בסיס $A = [T]_B$, $A^* = [T^*]_B$. כבר הוכחנו שאם T נורמלית אז A נורמלית ולכן מהמשפט הקודם קיים f מתאים כך ש- $[f(T)]_B = [f(T)]_B = f([T]_B) = f(A) = A^* = [T^*]_B$. סה"כ $[f(T)]_B = [T^*]_B$ ומח"ע העברת בסיס $T^* = f(T)$. ■

אם $T: V \rightarrow V$ ט"ל, $U, W \subseteq V$ תמ"ים T -איוואריאנטי כך ש- $U \oplus W = V$. אם B בסיס של V , כאשר קישא של הבסיס הוא הבסיס של U אז:

$$[T]_B = \begin{pmatrix} [T|_U]_B & \\ & [T|_W]_B \end{pmatrix}$$

בפרט בעבור ניצבים $U \subseteq V \implies V = U \oplus U^\perp$. ניעזר בכך כדי להוכיח את המשפט הבא:

משפט 138. אם $U \subseteq V$ תמ"ו איוואריאנטי ביחס ל- T אז U^\perp הוא T^* -איוואריאנטי.

הוכחה. יהי $w \in U^\perp$. רוצים להראות $T^*w \in U^\perp$. יהי $u \in U$ אז:

$$\langle T^*w | u \rangle = \langle w | Tu \rangle = \langle w | u' \rangle, \quad u' \in U \implies \langle w | u' \rangle = 0 \quad \top$$

■

משפט 139. בעבור $T: V \rightarrow V$ נורמלית, אם היא U -איוואריאנטי אז גם T^* הוא U -איוואריאנטי

הוכחה. נבחין ש- $T^* = f(T)$ כלשהו, וכן U הוא T -איוואריאנטי ולכן U הוא $f(T)$ -איו' וכאן די גמרנו את ההוכחה. ■

מסימטריות U^\perp הוא T^* , מהמשפט גם $(T^*)^*$ איו' ולכן T -איוואריאנטי.

משפט 140. יהי V מעל \mathbb{R} מ"ו וכן $T: V \rightarrow V$ ט"ל. אז קיים $U \subseteq V$ שהוא T -איוואריאנטי וממדו לכל היותר 2.

משפט 141. מעל $M_2(\mathbb{R})$, קיימת צורה כללית למטריצות לא לכסינות נורמליות.

הוכחה. ננסה להבין מי הן $A \in M_2(\mathbb{R})$ שהן נורמליות. מעל \mathbb{C} הן פשוט לכסינות. נבחין ש-:

$$A = \begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix}, \quad A^* = f(A) \in \mathbb{R}_{\leq 1}[x] = \alpha A + \beta I, \quad A = \alpha A^T + \beta I = \alpha(\alpha A + \beta I) + \beta I \quad (1)$$

$$\implies \begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \alpha^2 a + \beta(\alpha + 1) & \alpha^2 b \\ \alpha^2 c & \alpha^2 d + \beta(\alpha + 1) \end{pmatrix} \quad (2)$$

$$\begin{cases} (b \wedge c \neq 0) & \alpha = 1 \implies A = A + 2\beta I \implies \beta = 0, \quad A = A^T + \beta I \\ (b \wedge c \neq 0) & \alpha = -1 \implies A^T = -A + \beta I \implies A + A^T = \begin{pmatrix} \beta & 0 \\ 0 & \beta \end{pmatrix} \implies b = -c, \quad A = \begin{pmatrix} a & b \\ -b & a \end{pmatrix} \\ (b \vee c = 0) & \implies A = \begin{pmatrix} a & 0 \\ 0 & d \end{pmatrix} \end{cases}$$

■

המקרה השני - זה פשוט סיבובים, אבל בניפוח (כי הדטרמיננטה היא $a^2 - b^2$).

הערה: מעל \mathbb{C} "זה מטופש" כי הפולינום מתפרק (ואז המרחב העצמי של ע"ע כלשהו יקיים את זה).

הוכחה. נפרק ל- $m_T(x)$ מינימלי ו- $g(x)$ גורם אי-פריק כך ש- $m_T(x) = g(x)h(x)$. לכל g אי פריק ב- \mathbb{R} מתקיים $\deg g \leq 2$, כי אם g ממעלה אחת סיימנו, אחרת הוא ממעלה 2 לפחות כי בהינתן שורש מרוכב a לפולינום $m_T(x)$ גם \bar{a} שורש, ואז $m_T(x) = (x - a)(x - \bar{a}) = (x^2 - |a|^2)$ דהיינו כל שורש מרוכב משויך לגורם ממשי ריבועי לכל היותר, ומשום ש- $m_T(x)$ מתפרק מעל המרוכבים, ניתן לסכם ש- g מדרגה 2 לכל היותר.

- אם g מממד 1 אז $g = x - \lambda$ כלשהו ואז V_λ המ"ו העצמי של λ הממשי, מרחב מממד $1 \leq 2$ המקיים את הדרוש.
- אם $\deg g = 2$ בה"כ ניתן להניח g מתוקן (נעביר את הקבוע ל- h). אז $g(x) = x^2 + ax + b$ ו- $g(T)$ אינו הפיך (מלמת החלוקה לפולינום מינימלי) כלומר $\exists 0 \neq v \in \ker g(T)$. לכן:

$$(T^2 + aT + bI)v = 0 \implies T^2v = -aTv - bv$$

ולכן $U = \text{span}(v, Tv)$ תמ"ו עם ממד לכל היותר 2 וגם T -איוואריאנטי.

■

סה"כ בשני המקרים מצאנו תמ"ו המקיים את הדרוש.

הערה 40. בעבור T נורמלית (ולא כללית) הטענה נכונה ללא תלות במשפט היסודי של האלגברה.

בעבור נורמליות, מהמשפט הספקטרלי ומטענות קודמות, עבור $T: V \rightarrow V$ ממשיית קיים בסיס \mathcal{B} של V שבעבורו המטריצה המייצגת של T היא מטריצת בלוקים 2×2 של מצורה של $\begin{pmatrix} a & b \\ -b & a \end{pmatrix}$:

$$[T]_{\mathcal{B}} = \text{diag} \left(\begin{pmatrix} a_1 & b_1 \\ -b_1 & a_1 \end{pmatrix}, \dots, \begin{pmatrix} a_k & b_k \\ -b_k & a_k \end{pmatrix}, \lambda_1 \dots \lambda_m \right)$$

כאשר כמובן $2k + m = n$.

8.2 \sim מטריצות אוניטריות

הגדרה 83. יהי V מ"פ. אז $T: V \rightarrow V$ תקרא אוניטרית (אם $\mathbb{F} = \mathbb{C}$) או אורתוגונלית (אם $\mathbb{F} = \mathbb{R}$) אם $T^*T = I$ או במילים אחרות $T^* = T^{-1}$ (מהגדרת הפיכה).

ברור ש"ל כזו היא נורמלית. **דוגמה.** עבור T_{θ} הסיבוב ב- θ מעלות, במישור \mathbb{R}^2 , אז $(T_{\theta})^* = T_{-\theta} = T_{\theta}^{-1}$. **דוגמה.** עבור T שיקוף מתקים $T^2 = I$ וכן $T^* = T = T^{-1}$ וסה"כ $T^* = T = T^{-1}$.

משפט. T איזומטריה אמ"מ מתקיים אחד מבין הבאים:

$$1. (T^* = T^{-1}) \quad \text{(ההגדרה)}$$

$$2. TT^* = T^*T = I$$

$$3. \forall u, v \in V: \langle Tu | Tv \rangle = \langle u | v \rangle$$

$$4. T \text{ מעבירה כל בסיס א"נ של } V \text{ לבסיס א"נ של } V$$

$$5. T \text{ מעבירה בסיס א"נ אחד של } V \text{ לבסיס א"נ של } V \text{ לבסיס א"נ [מקרה פרטי של 4 בצורה טריוויאלית, אך גם שקול!]}$$

$$6. \forall v \in V: \|Tv\| = \|v\|$$

כלומר: היא משמרת זווית (העתקה פנימית) וגודל.

הגדרה 84. העתקה $T: V \rightarrow V$ (כאשר V מ"פ) תקרא איזומטריה אם $\forall v \in V: \|v\| = \|Tv\|$

באופן כללי אוניטרית/אורתוגונלית שקולות לאיזומטריה לינארית (כלומר שם כללי לאורתוגונליות/אוניטריות יהיה איזומטריות).

הערה 41. איזומטריה, גם מחוץ לאלגברה לינארית, היא פונקציה שמשמרת נורמה/גודל.

הערה 42. אפשר להסתכל על מתכונה 4 על איזומטריות לינאריות כעל איזומורפיזם של מ"פ.

הוכחה. נפרק לרצף גרירות

$$1 \rightarrow 2 \quad T^* = T^{-1} \implies \langle Tv | Tu \rangle = \langle v | T^*Tu \rangle = \langle v | u \rangle$$

$2 \rightarrow 3$ נאמר ש- $(v_1 \dots v_n)$ א"נ. צ"ל. $(Tv_i)_{i=1}^n$ א"נ. לשם כך נצטרך להוכיח את שני התנאים - החלק של האורתו והחלק של הנורמלי. בשביל שניהם מספיק להוכיח ש: $\langle Tv_i | Tv_j \rangle = \langle v_i | v_j \rangle = \delta_{ij}$

$$3 \rightarrow 4 \quad \text{טריוויאלי}$$

$$4 \rightarrow 5 \quad \text{יהי } (v_1 \dots v_n) \text{ בסיס א"נ כך ש-} (Tv_1 \dots Tv_n) \text{ א"נ. אז:}$$

$$v = \sum_{i=0}^n \alpha_i v_i \implies \|v\|^2 = \left\langle \sum_{i=0}^n \alpha_i v_i \middle| \sum_{i=0}^n \alpha_i v_i \right\rangle = \sum_{i=0}^n |\alpha_i|^2$$

$$\|Tv\|^2 = \left\langle T \left(\sum_{i=0}^n \alpha_i v_i \right) \middle| T \left(\sum_{i=0}^n \alpha_i v_i \right) \right\rangle = \left\langle \sum_{i=0}^n \alpha_i T(v_i) \middle| \sum_{i=0}^n \alpha_i T(v_i) \right\rangle = \sum_{i=0}^n |\alpha_i|^2$$

$$5 \rightarrow 1 \quad \text{מניחים } \forall v \in V: \|Tv\| = \|v\| \text{ ידועות השקילויות הבאות:}$$

$$T^* = T^{-1} \iff T^*T = I \iff T^*T - I = 0$$

בעבר ראינו את הטענה הבאה: נניח ש- S צמודה לעצמה וכן ש- $\langle Sv | v \rangle = 0, \forall v$, אז $S = 0$. במקרה הזה:

$$S := T^*T - I \implies S^* = (T^*T - I)^* = (T^*T)^* - I^* = T^*(T^*)^* - I = S \implies S^* = S$$

והיא אכן צמודה לעצמה. עוד נבחין ש:

$$\langle Sv | v \rangle = \langle (T^*T - I)v | v \rangle = \langle T^*Tv | v \rangle - \langle v | v \rangle = \langle Tv | Tv \rangle - \langle v | v \rangle = \|Tv\|^2 - \|v\|^2 = 0$$

השוויון האחרון נכון מההנחה היחידה שלנו ש- $\|Tv\| = \|v\|$. סה"כ $T^*T - I = 0$. סה"כ הוכחנו $T^*T - I = 0$ שזה שקול ל- $T^* = T^{-1}$ מהשקילויות לעיל כדרוש.

משפט 142. תהי $T: V \rightarrow V$ איזומטריה, ו- λ ע"ע של T . אז $|\lambda| = 1$.

הוכחה. יהי v ו"ע של הע"ע λ . אז:

$$|\lambda|^2 \langle v | v \rangle = \lambda \bar{\lambda} \langle v | v \rangle = \langle Tv | Tv \rangle = \langle v | v \rangle$$

הערה 43. מעל המרוכבים לא מתקיים $\lambda \in \{1, -1\}$, בעוד מעל הממשיים כן.

הגדרה 85. תהי $A \in M_n(\mathbb{F})$. אז A תיקרא אוניטרית/אורתוגונלית אם $A^* = A^{-1}$.

משפט 143. אוניטרית אמ"מ $AA^T = I$.

משפט 144. אורתוגונלית אמ"מ $AA^T = I$.

הערה 44. אוניטרית בה מלשון unit - היא שומרת על הגודל, על וקטורי היחידה (ה-unit vectors).

משפט 145. יהי B בסיס א"נ של V ו- $T: V \rightarrow V$ אז T אוניטרית/אורתוגונלית אמ"מ $A = [T]_B$ אוניטרית/אורתוגונלית.

הוכחה.

$$AA^* = [T]_B [T^*]_B = [TT^*]_B, I = AA^* \iff [TT^*]_B = I \iff TT^* = I$$

"היה לי מרצה בפתוחה שכתב דבר לא מדויק בסיכום, ואז הוריד נקודות לסטודנטים שהסתמכו על זה. הוא אמר שזה מתמטיקה, אתם אחראים להבין מה נכון או לא - גם אם כתבתי שטויות".

סימון 14. א"נ = אוניטרית בהקשר של מטריצות (בהקשר של מרחבים - אורתונורמלי)

משפט 146. התאים הבאים שקולים על $A \in M_n(\mathbb{F})$.

1. A א"נ

2. שורות A מהוות בסיס א"נ של \mathbb{F}^n (ביחס למכפלה הפנימית הסטנדרטית)

3. עמודות A מהוות בסיס א"נ של \mathbb{F}^n .

4. (ביחס למכפלה הפנימית הסטנדרטית) $\forall u, v \in \mathbb{F}^n: \langle Au | Av \rangle = \langle u | v \rangle$

5. (ביחס למכפלה הפנימית הסטנדרטית) $\forall v \in \mathbb{F}^n: \|Av\| = \|v\|$

הערה שלא קשורה למשפט: נאמר ש- $[T]_B^* = [T^*]_B$ אמ"מ B בסיס א"נ. עבור בסיס שאינו א"נ זה לא בהכרח מתקיים.

הערה נוספת: זה בערך אמ"מ כי יש כמה מקרי קצה כמו מטריצת האפס.

הוכחה.

$1 \iff 2$ נוכיח את הגרירה הראשונה

$$\begin{pmatrix} - & v_1 & - \\ & \vdots & \\ - & v_n & - \end{pmatrix} \begin{pmatrix} | & & | \\ \bar{v}_1^T & \dots & \bar{v}_n^T \\ | & & | \end{pmatrix} = AA^* = I \iff A \text{ א"נ} \implies v_i \bar{v}_j^T = \delta_{ij}$$

הטענה האחרונה שקולה לכך ש- $v_1 \dots v_n$ בסיס א"נ (ביחס למ"פ הסטנדרטית של \mathbb{F}^n)

$1 \iff 3$ מספיק להוכיח A א"נ אמ"מ A^T א"נ. מסימטריה $((A^T)^T = A)$ למעשה מספיק להוכיח A א"נ גורר A^T א"נ. נוכיח:

$$A^* A = I \implies A^T \bar{A} = I \implies (A^T)^* = \bar{A} \implies A^T (A^T)^* = I$$

$1 \iff 4$ נתבונן ב- $T_A: \mathbb{F}^n \rightarrow \mathbb{F}^n$ כאשר \mathcal{E} הבסיס הסטנדרטי. אז $[T_A]_{\mathcal{E}} = A$ אז T_A א"נ אמ"מ A . אז:

$$\langle Au | Av \rangle = \langle T_A u | T_A v \rangle = \langle u | v \rangle$$

$1 \iff 5$ אותה הדרך כמו קודם.

8.2.1 צורה קאנונית למטריצה אורתוגונלית

שאלה. מהן המטריצות $A \in M_2(\mathbb{R})$ האורתוגונליות?

התשובה. בהינתן $A = \begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix}$ מהיות העמודות והשורות מהוות בסיס א"נ:

$$\begin{cases} a^2 + b^2 = 1 \\ c^2 + d^2 = 1 \\ ac + bd = 0 \end{cases} \implies a = \cos \theta, b = \sin \theta$$

עוד נבחין ש- $ac + bd = 0$ כי:

$$AA^T = I \implies \begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a & c \\ b & d \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a^2 + b^2 & ac + bd \\ ac + bd & c^2 + d^2 \end{pmatrix} = I$$

סה"כ מכך ש- $a^2 + b^2 = 1$ ו- $c^2 + d^2 = 1$ נקבל שתי צורות אפשריות:

$$A_1 := A = \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ \sin \theta & -\cos \theta \end{pmatrix} \vee A_2 := A = \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix}$$

נבחין ש- A_2 הוא סיבוב ב- θ , ו- A_1 שיקוף ניצב ביחס ל- $\frac{\theta}{2}$. זה לא מפתיע שכן $\det A_1 = -1$, $\det A_2 = 1$. יתרה מכך, A_1 לכסינה עם ע"ע שני ע"ע -1 ו-1.

"אם הייתם רוצים תקופות מבחנים נורמליות הייתם צריכים להיוולד בזמן אחר"

הערה 45. לבדיקת שפיות, ננסה לפרק מעל המרוכבים את הצורה שקיבלנו, ואכן:

$$\begin{pmatrix} e^{i\theta} & 0 \\ 0 & e^{-i\theta} \end{pmatrix} \sim \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix}$$

בהתאם לכך ש- $|e^{i\theta}| = |e^{-i\theta}| = 1$ כמצופה מע"עים של מטריצה אוניטרית.

מסקנה 20 (הצורה הנורמלית של ט"ל אורתוגונלית). תהי $T: V \rightarrow V$ אורתוגונלית. אז קיים בסיס א"נ של V , שביחס אליו המטריצה המייצגת את T היא מהצורה:

$$\begin{pmatrix} A_{\theta_1} & & & & \\ & \ddots & & & \\ & & A_{\theta_n} & & \\ & & & 1 & \\ & & & & \ddots & \\ & & & & & 1 & \\ & & & & & & -1 & \\ & & & & & & & \ddots & \\ & & & & & & & & -1 \end{pmatrix}$$

כאשר:

$$A_{\theta_i} = \begin{pmatrix} \cos \theta_i & \sin \theta_i \\ -\sin \theta_i & \cos \theta_i \end{pmatrix}$$

(אוניטרית לא מעיינת כי היא נורמלית ולכן לכסינה אורתוגונלית מהמשפט הספקטרלי)

הוכחה. ידוע עבור נורמלית:

$$A = \begin{pmatrix} \begin{bmatrix} a_1 & b_1 \\ -b_1 & a_1 \end{bmatrix} & & & \\ & \ddots & & \\ & & \begin{bmatrix} a_m & b_m \\ -b_m & a_m \end{bmatrix} & \\ & & & \lambda_1 & \\ & & & & \ddots & \\ & & & & & \lambda_k \end{pmatrix}$$

נסמן $\square_i = \begin{pmatrix} a_i & b_i \\ -b_i & a_i \end{pmatrix}$. במקרה הזה משום שהיא אורתוגונלית על \mathbb{R} אז $\lambda_i = \pm 1$ כי $|\lambda_i| = 1$. נתבונן במטריצה \square_i כלשהי, אז \square_i הנפרש ע"י U : $u_k, u_{k+1} = U$ מקיים:

$$[T]_{U|B_U} = \square_i = \begin{pmatrix} a_i & b_i \\ -b_i & a_i \end{pmatrix} \quad [Tu_k]_{U_B} = \begin{pmatrix} a \\ -b \end{pmatrix}, \quad [Tu_{k+1}] = \begin{pmatrix} b \\ a \end{pmatrix}$$

ומשום שהצמצום של אורתוגונלית על מ"ו T -אינוואריאנטי היא עדיין אורתוגונלית, והראנו שהאורתוגונליות ב- $M_2(\mathbb{R})$ הן מטריצות הסיבוב/השיקוף+סיבוב לעיל. המטריצה של שיקוף+סיבוב ב- $\frac{\theta}{2}$ לכסינה ולכן תהפוך לע"ל $\lambda_1 \dots \lambda_n$ (עד לכדי סדר איברי בסיס) שהם בהכרח מגודל ± 1 בכל מקרה, ויבלעו בשאר הע"ל, ובכך סיימנו. ■

אבל האם הייצוג יחיד? ננסה להבין את יחידות הייצוג עבור נורמלית כללית, ומשם לגזור על אורתוגונלית.

משפט 147. כל שתי מטריצות בצורה לעיל שמייצגות את אותה $T: V \rightarrow V$ נורמלית, שוות עד כדי סדר הבלוקים על האלכסון. (יש כאן מה להוכיח רק בעבור \mathbb{R} , שכן מעל \mathbb{C} לכסין).

הוכחה. ידוע שבעבור $\lambda_1 \dots \lambda_k$ ע"לים:

$$f_T(x) = \left(\prod (x - \lambda_i) \right) \left(\prod (x^2 - 2a_i x + a_i^2 + b_i^2) \right)$$

כאשר המכפלה הראשונה באה מהע"לים והשנייה מהריבועים \square_i . נבחין שלכל תמ"ו a_i נקבע ביחידות, ולכן b_i נקבל ביחידות ■ כדי סימן (נסיק זאת מהפולינום האופייני). ברור שהע"לים נקבעים ביחידות עוד מההרצאות הראשונות.

אז מאיפה בה שינוי הכיוון של b , בעבור מטריצות אורתוגונליות? כלומר, מדוע A_{θ_i} שקולה ל- $A_{-\theta_i}$? זאת כי הן דומות באמצעות ההעתקה שהופכת את הצירים, מה ששקול להחליף את עמודות A_{θ_i} .

תרגיל. חשבו: (כולל פתרון)

$$\begin{pmatrix} -1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a & b \\ -b & a \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a & -b \\ b & a \end{pmatrix}$$

מכאן נסיק שאכן המטריצות להלן דומות עד לכדי שינוי בסיס, וזו הסיבה שלא איכפת לנו מהסימן של b .

הערה 46. למעשה, משום שהמטריצות \square_i אינן פריקות למרחבים אינוואריאנטים קטנים יותר, ולכן נוכל להפוך את כל הבלוקים על המטריצה ולקבל בלוקי ג'ורדן, שכבר אנחנו יודעים שהם יחידים.

8.2.2 המשפט הספקטלי בניסוח מטריציוני

משפט 148 (המשפט הספקטלי "בשפה קצת מטריציונית"). תהי $A \in M_n(\mathbb{F})$ מטריצה צמודה לעצמה. אז קיימת מטריצה P אורתוגונלית/אוניטרית (בהתאם לשדה ממנו יצאנו), ומטריצה אלכסונית D כך ש- $A = P^{-1}DP$

כלומר - מטריצת מעבר הבסיס של המשפט הספקטלי, שמעביר אותנו לפירוק הספקטלי, היא איזומטריה. למעשה חיזקנו את המשפט הספקטלי - המעבר לבסיס המלכסן, מסתבר להיות מיוצג ע"י מטריצות איזומטריות.

המרה מדגיש שלא השתמשנו במשפט הזה בכלל בבסיסים ווקטורים - אפשר לתאר את עולם הדיון של המטריצות, מעצם היותו עולם דיון איזומורפי להעתקות ולמרחבים וקטורים, בלי לדבר בכלל על העתקות ומרחבים וקטורים. המשפט מתאר באופן טהור מטריצות בלבד.

למה 13. תהי $A \in M_n(\mathbb{F})$ מטריצה ריבועית, וכן $\{e_1 \dots e_n\}$ בסיס א"נ של V . נניח ש- A היא מטריצת המעבר מבסיס $\{e_1 \dots e_n\} \rightarrow \{v_1 \dots v_n\}$. אז איזומטריה אמ"מ $\{v_1 \dots v_n\}$ בסיס אורתונורמלי.

הוכחת המשפט. תהי $T_A: \mathbb{F}^n \rightarrow \mathbb{F}^n$ כך ש- $T_A(x) = Ax$. אז $A = [T_A]_{\mathcal{E}}$ כאשר $\mathcal{E} = \{e_1 \dots e_n\}$ הבסיס הסטנדרטי. ידוע של- T_A יש בסיס אורתונורמלי מלכסן, כלומר קיים בסיס א"נ \mathcal{B} כך ש- $[T_A]_{\mathcal{B}} = D$ כאשר D אלכסונית כלשהי. נבחין ש- $[T_A]_{\mathcal{B}} = [Id]_{\mathcal{B}}^{\mathcal{B}} [T_A]_{\mathcal{E}} [Id]_{\mathcal{E}}^{\mathcal{B}}$, נסמן $P = [Id]_{\mathcal{E}}^{\mathcal{B}}$ ונבחין ש- $[T_A]_{\mathcal{B}} = P^{-1}AP$ ומהלמה P מטריצת מעבר מבסיס א"נ לבסיס א"נ ולכן איזומטריה. סה"כ הראנו את הדרוש. ■

"יאללה הפסקה? לא!"

8.3 פירוק פולארי

8.3.1 מבוא, וקישור לתבניות בילינאריות

הערה 47. במקרה של $\mathbb{F} = \mathbb{R}$ נקבל ש-

$$A = P^{-1}DP \implies PP^T = I \implies P^{-1} = P^T \implies A = P^TDP$$

מה שמחזיר אותנו לתבניות בילינאריות. נוכל לקשר את זה לסינגטורה. זאת כי A לא רק דומה, אלא גם חופפת ל- D . גם מעל \mathbb{C} נקבל דברים דומים, אך לא במדויק, שכן מכפלה פנימית מעל \mathbb{C} היא סקווי-בילינארית ולא בילינארית רגילה.

משפט 149. עבור $A \in M_n(\mathbb{C})$ נורמלית, אז

$$\bullet A^* = A \text{ (צמודה לעצמה) אמ"מ כל הע"ע שלה ממשיים.}$$

$$\bullet A^* = A^{-1} \text{ אמ"מ כל הע"ע שלה מנורמה 1.}$$

הוכחה. את הכיוון \Leftarrow כבר הוכחנו. נותר להוכיח את הכיוון השני.

• נניח שכל הערכים העצמיים ממשיים, ו- A נורמלית. נוכל להשתמש במשפט הספקטרי עליה: לכן קיימת מטריצה אוניטרית P ואלכסונית Λ כך ש- $A = P^{-1}\Lambda P$. ידוע $\Lambda \in M_n(\mathbb{R})$ כי אלו הע"ע מההנחה. נבחין ש-:

$$A^* = P^* \Lambda^* (P^{-1})^* = P^{-1} \Lambda P = A$$

כי $PP^* = I$ ו- Λ אוניטרית (אז ה-transpose לא עושה שום דבר) מעל \mathbb{R} (אז ההצמדה לא עושה שום דבר).

• נניח A נורמלית וכל הע"ע מנורמה 1. נוכיח A אוניטרית. בעבור הפירוק הספקטרי לעיל $A = P^{-1}\Lambda P$ נקבל כאן ש- Λ אוניטרית, ומהמשפט הספקטרי P אוניטרית גם כן. A מכפלה של 3 אוניטריות ולכן אוניטרית.

(הסיבה שמכפלה של אוניטריות היא אוניטרית: בעבור A, B א"נ מתקיים

$$\forall v \in V: \langle ABv | ABv \rangle = \langle Bv | Bv \rangle = \langle v | v \rangle$$

משמרת מכפלה פנימית, וזה שקול להיותה אוניטרית ממשפט לעיל)

תזכורת: אם V ממ"פ מעל \mathbb{F} , אז $T: V \rightarrow V$ תקרא חיובית או אי-שלילית (וכן) אם $T = T^*$ וגם $\langle Tv | v \rangle \geq / > 0$ ו- $\forall v \neq 0$.

משפט 150. נניח ש- $A = A^* \in M_n(\mathbb{F})$, אז התנאים הבאים שקולים (קיצור מוכר: (TFAE, the following are equivalent):

1. T_A חיובית/אי שלילית על \mathbb{F}^n .

2. לכל $T: V \rightarrow V$ ובסיס א"נ B כך ש- $A = [T]_B$, T חיובית/אי שלילית.

3. קיימים $T: V \rightarrow V$ חיובית/אי שלילית ו- B בסיס, כך ש- $A = [T]_B$.

4. הע"ע של A (יודעים ממשיים כי צמודה לעצמה) חיובים/אי שליליים.

הוכחה. מספיק לטעון זאת כדי להוכיח את השקילויות של 1, 2, 3:

$$\langle Tv | v \rangle_V = \langle [T]_B [v]_B | [v]_B \rangle_{\mathbb{F}^n} = \langle A[v]_B | [v]_B \rangle_{\mathbb{F}^n}$$

בשביל $1 \rightarrow 2$, ידוע שהאגף הימני גדול מ-0 מההנחה שהיא חיובית/אי שלילית על \mathbb{F}^n , ומכאן הראנו שהמיוצגת בכל בסיס חיובית כדרוש. בשביל $1 \rightarrow 3$, נפעיל טיעונים דומים מהאגף השמאלי במקום. הגרירה $2 \rightarrow 3$ ברורה. סה"כ הראינו את $1 \leftrightarrow 2 \leftrightarrow 3$.

עתה נוכיח שקילות בין 1 ל-4.

$1 \rightarrow 4$ יהי $\lambda \in \mathbb{R}$ ע"ע של A (נוכל להניח ממשי כי A צמודה לעצמה)

$$\langle Av | v \rangle = \lambda \|v\|^2 > 0 \implies \lambda > 0$$

$4 \rightarrow 1$ יהי $B = (v_1 \dots v_n)$ בסיס א"נ של ו"ע, ויהי $v = \sum \alpha_i v_i \in V$. נקבל:

$$\langle T_A v | v \rangle = \langle Av | v \rangle = \left\langle A \sum_{i=1}^n \alpha_i v_i \middle| \sum_{i=1}^n \alpha_i v_i \right\rangle = \sum \lambda_i |\alpha_i|^2 > 0$$

תזכורת: מעל \mathbb{R} , הוכחנו שלכל תבנית סימטרית, יש ייצוג יחיד באמצעות מטריצה אלכסונית עם $-1, 1, 0$ על האלכסון.

סימון 15. הסינגטורה של f תסומן ע"י $\sigma_-(f), \sigma_0(f), \sigma_+(f)$ כמספר האפסים, האחדים ו- -1 ב- f .

המשך תזכורת: כל מטריצה סימטרית חופפת למטריצה יחידה מהצורה לעיל.

משפט 151. נניח ש- A מייצגת את התבנית הסימטרית f (עולם הדין מעל \mathbb{R}). אז, הסינגטורה שווה ל- $\sigma_+ = \#(\lambda \mid \lambda > 0)$ עבור λ ע"ע עם חזרות (במידה ושייך ליותר מו"ע יחיד). באופן דומה $\sigma_- = \#(\lambda \mid \lambda < 0)$ כאשר λ ע"ע.

הוכחה. משום ש- A מייצגת סימטרית אז A סימטרית. לפי המשפט הספקטרי קיימת P אורתוגונלית ו- Λ אלכסונית כך ש- $A = P^{-1}\Lambda P = P^T\Lambda P$. דומה לאלכסונית וחופפת אליה. בעזרת נרמול המטריצה Λ האלכסונית (ניתן לבצע תהליך נרמול באמצעות פעולות שקולות תחת חפיפה), היא חופפת למטריצה מהצורה $\text{diag}(1 \dots 1, -1 \dots -1, 0 \dots 0)$ כאשר הסימן נקבע לפני הנרמול. ■

מכאן, שבהינתן A מטריצה חיובית, היא מייצגת תבנית בילינארית חיובית וגם מייצגת העתקה חיובית. זה מתבקש ששתי ההגדרות שלנו לחיוביות יהיו זהות.

משפט 152 (קיום שורש לצמודה לעצמה אי-שלילית). תהי $T: V \rightarrow V$ צמודה לעצמה ואי שלילית $\langle Tv | v \rangle \geq 0$, אז קיימת יחידה $R: V \rightarrow V$ אי-שלילית צמודה לעצמה כך ש- $R^2 = T$.

הוכחה. **קיום.** מהמשפט הספקטרי קיים בסיס α של V של ו"ע להעתקה אי-שלילית כל הע"ע הם אי-שליליים.

$$[T]_B^B = \text{diag}(\lambda_1 \dots \lambda_n) \quad [R]_B^B = \text{diag}(\sqrt{\lambda_1} \dots \sqrt{\lambda_n})$$

(ראינו זאת בתרגול). עוד נבחין ש- R צמודה לעצמה כי ע"ע ממשיים.

יחידות. נבחין שכל ו"ע של T הוא ו"ע של R : יהי $i \in [n]$ ו- $B = (e_1 \dots e_n)$ בסיס מלכסן, ואז עבור R צמודה לעצמה כלשהי מתקיים: אז ו"ע של R עם ע"ע $\sqrt{\lambda}$ הוא ו"ע של T עם ע"ע λ כי:

$$\lambda v = R^2 v = T v \implies R v = \sqrt{\lambda} v$$

הגרירה נכונה מאי-שליליות R שהמשפט מניח עליה יחידות. כלומר הערכים העצמיים של R כלשהי (לא בהכרח זו שברחנו בהוכחת הקיום) נקבעים ביחידות מע"ע של T . בסיס של ו"ע של T הוא בסיס ו"ע של R , סה"כ ראינו איך R פועלת על בסיס ו"ע כלשהו של T מה שקובע ביחידות את R . ■

סימון 16. את ה- R לעיל נסמן $\sqrt{T} := R$.

מסקנה 21 (פירוק שולסקי). לכל A צמודה לעצמה ואי-שלילית חיובית קיים פירוק יחיד של מטריצה R משולשית עליונה כך ש- $A = R R^*$.

8.3.2 ניסוח הפירוק הפולארי

משפט 153 (פירוק פולארי בעבור העתקות). תהי $T: V \rightarrow V$ הפיכה, אז קיימות $R: V \rightarrow V$ חיובית וצמודה לעצמה ו- $U: V \rightarrow V$ אוניטרית כך ש- $T = R U$.

הערה 48. לא הנחנו T צמודה לעצמה. הפירוק נכון להעתקה הפיכה כללית.

הוכחה. נגדיר $S = T T^*$. נבחין ש- S צמודה לעצמה וחיובית:

$$\forall v \in V, v \neq 0: \langle S v | v \rangle = \langle T T^* v | v \rangle = \langle T^* v | T^* v \rangle = \|T^* v\|^2 > 0$$

האי-שוויון האחרון נכון כי $\ker T = \{0\}$, ממשפט קודם $\ker T^* = \{0\}$, ו- $v \neq 0$. יצא שזה חיובי ולכן בפרט ממשי, כלומר היא צמודה לעצמה וחיובית.

קיימת יחידה $R: V \rightarrow V$ צמודה וחיובית כך ש- $S = R^2$. כל ערכיה העצמיים של $R = \sqrt{S}$ אינם 0, ולכן היא הפיכה (ראינו בהוכחה של קיומה שהיא לכסינה יחדיו עם S).

נגדיר $U = R^{-1} T$. נותר להראות ש- U אוניטרית.

$$U^* U = (R^{-1} T)^* (R^{-1} T) = T^* \underbrace{(R^{-1})^*}_{R^{-1}} R^{-1} T = T^* (R^{-1})^2 T = T^* S^{-1} T = T^* (T T^*)^{-1} T = I$$

כדרוש. הטענה $(R^{-1})^* = R^{-1}$ נכונה משום ש- R צמודה לעצמה. ■

הערה 49 (לגבי יחידות). אם T אינה הפיכה, מקבלי ש- R יחידה אבל U אינה. בשביל לא הפיכות נצטרך להצטמצם לבסיס של התמונה ועליו לפרק כמתואר לעיל. במקרה של הפיכות אז $T = R U = R \tilde{U}$ ואז נקבל R הפיכה כלומר $U = \tilde{U}$ וגם U הפיכה.

עתה נראה ש- R נקבעת ביחידות (בניגוד ליחידות U – יחידות R נכונה גם בעבור פירוק פולארי של העתקה שאיננה הפיכה): הוכחה.

$$T T^* = R U (R U)^* = R U U^* R^* = R^2$$

כלומר R היא בכל פירוק שורש, והראינו קודם את יחידות השורש. ■

הערה 50. קיים גם פירוק כנ"ל מהצורה $T = UR$.

הוכחה. באותו האופן שפירקנו את T , נוכל לפרק את $T^* = \tilde{R}\tilde{U}$ פירוק פולארי. נפעיל * על שני האגפים ונקבל:

$$T^* = \tilde{R}\tilde{U} \implies T = (T^*)^* = \tilde{U}^* \tilde{R}^* = \tilde{U}^{-1} \tilde{R}$$

נסמן $U =: \tilde{U}^{-1}$, $\tilde{R} =: R$ וסה"כ $T = UR$ כדרוש.

למה 14. עבור $T: V \rightarrow V$ אז ל- TT^* , נגדיר $S = TT^*$. נבחין ש- S צמודה לעצמה וחיובית:

$$\forall v \in V, v \neq 0: \langle Sv | v \rangle = \langle TT^*v | v \rangle = \langle T^*v | T^*v \rangle = \|T^*v\|^2 > 0$$

יש אותם הערכים העצמיים.

הוכחה. ניעזר בפירוק הפולארי:

$$TT^* = RUU^*R^*$$

$$= R^2$$

$$TT^* = U^{-1}R^2U$$

סה"כ TT^*, T^*T הן העתקות דומות ולכן יש להן את אותם הערכים העצמיים.

הערה 51. אז איך זה קשור לפולארי? R האי-שלילית היא "הגודל", בעוד U האוניטרית לא משנה גודל – היא ה"זווית".

משפט 154 (פירוק פולארי בעבור מטריצות). תהי $A \in M_n(\mathbb{F})$ הפיכה, אז קיימות $U, R \in M_n(\mathbb{F})$ כאשר U א"נ ו- R חיובית צמודה לעצמה כך ש- $A = UR$.

הוכחה. נסתכל על A^*A . היא חיובית וצמודה לעצמה (בדומה לעיל). אז $A^*A = P^{-1}DP$, כאשר D אלגסונית חיובית. כאשר $R = P^{-1}\sqrt{D}P$, $R^2 = AA^*$ היא קיימת ויחידה מאותה הוכחה בדיוק להעתקות.

8.4 ~ פירוק SVD

8.4.1 ניסוח והוכחת SVD

הערה 52. SVD הינו קיצור של Singular Value Decomposition.

משפט 155 (גרסה מצומצמת של פירוק לערכים סינגולריים). לכל מטריצה $A \in M_n(\mathbb{F})$ קיימות מטריצות אוניטריות U, V ומטריצה אלכסונית עם ערכים אי-שליליים כך ש- $A = UDV$.

הוכחה. ידוע שניתן לכתוב $A = \tilde{U}R$ פירוק פולארי. משום ש- R צמודה לעצמה, ניתן לפרקה ספקטרלית ל- V אוניטרית ו- D אלכסונית אי-שלילית (כי R אי-שלילית) כך ש- $R = V^{-1}DV$ סה"כ:

$$A = \underbrace{\tilde{U}V^{-1}}_{=:U} DV = UDV \quad \top$$

כי $\tilde{U}V^{-1}$ מכפלה של אוניטריות ולכן U אוניטרית כנדרש.

הערה 53. משום ש- U, V איזומטריות אז $U^* = U^{-1}$, $V^* = V^{-1}$ ובגלל ש- D אלכסונית אז $D^* = D$. לכן:

$$AA^* = (UDV)(V^*D^*U^*) = UD^2U^{-1}$$

$$A^*A = (V^*D^*U^*)(UDV) = V^{-1}D^2V$$

הגדרה 86 (ערך סינגולרי של מטריצה). הערכים העצמיים האי-שליליים של A^*A נקראים הערכים הסינגולריים והם נקבעים ביחידות ע"י A .

הגדרה 87 (ערך סינגולרי של העתקה). σ הוא ערך סינגולרי של העתקה T הוא אמ"מ $\sigma \in \mathbb{R} \wedge \sigma \geq 0$ וגם σ^2 הוא ע"ע של TT^* .

סימון 17. את הערכים הסינגולריים של העתקה/מטריצה A כלשהי נסמן ב- $\sigma_1 \dots \sigma_n$ כאשר $\forall i \geq j: \sigma_i \geq \sigma_j$.

משפט 156. פירוק SVD הוא יחיד (גם למטריצה שאיננה ריבועית/הפיכה), בהנחה שהערכים הסינגולריים שונים.

הוכחה. יהיו שני פירוקי SVD של מטריצה A הפיכה כלשהי, נסמנם:

$$A = \bar{U}\bar{D}\bar{V}^T \wedge A = UDV^T$$

אז:

$$AA^* = UD^2U^{-1} = \bar{U}^*\bar{D}^2\bar{U}^{-1} \wedge A^*A = V^{-1}D^2V = \bar{V}^{-1}\bar{D}^2\bar{V}$$

בגלל ש- \bar{D}^2, D^2 אלכסוניות, ומיחידות הפירוק הספקטרלי, $D = \bar{D}$, $V = \bar{V}$, $U = \bar{U}$.

8.4.2 הרחבת SVD להעתקות שאינן אופרטורים

הערה 54. במסדרת הקורס הזה, ראינו פירוק SVD של מטריצה ריבועית בלבד. חלק מהחזקה של פירוק SVD נובע מקיומו למטריצות שאינן בהכרח ריבועיות, דהיינו, לכל מטריצה סופית. יש לו מגוון רחב של שימושים במדעי המחשב. כדי להבין לעומק יותר כיצד פירוק SVD עובד, כתבתי את תת-הפרק הזה.

הגדרה 88. מטריצה $A \in M_{m \times n}(\mathbb{F})$ (לא בהכרח ריבועית) מוגדרת להקרא אלכסונית אם $a_{ij} \neq 0 \implies i = j$.

משפט 157 (גרסה מורחבת של פירוק לערכים סינגולריים). תהי $A \in M_{m \times n}(\mathbb{F})$ מטריצה ($\mathbb{F} \in \{\mathbb{R}, \mathbb{C}\}$) שאיננה מטריצת האפס, אז קיים פירוק למטריצות $U \in M_{m \times n}(\mathbb{F})$, $V \in M_{n \times m}(\mathbb{F})$, $\Sigma \in M_{m \times n}$ אלכסונית, כך ש- $A = U\Sigma V^T$.

אזהרה! ההוכחה להלן שבורה ואני עובד עליה. שאר הפרק אמור להיות בסדר.

הוכחה. נגדיר $T_A: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m$ ע"י $T_A(x) = Ax$. נתבונן בצמצום של המקסימלי של T_A לאיזומטריה, כלומר נגדיר $W = \ker A$ ואז נרחיבו לבסיס B של \mathbb{R}^n , ונגדיר $B_E = B \setminus B_W$. אז $T(B_E)$ בת"ל ונגדיר $E = \text{span } B_E$, ואכן מתקיים $(T_A)|_{B_E}$ איזו. למטריצה המייצגת של $(T_A)|_{B_E}$ נסמנה A , קיים פירוק SVD הוא $\tilde{A} = \tilde{U}\tilde{\Sigma}\tilde{V}^T$. נוסף שורות/עמודות אפסים ל- $\tilde{\Sigma}$ עד שנקבל $\Sigma \in M_{m \times n}$ אלכסונית. ידוע ש- \tilde{A} מטריצה שכל שורותיה מופיעות ב- A , ובה"כ (עד לכדי סדר שורות ב- V שניתן לבחירה) נניח שאלו השורות הראשונות.

הגדרה 89. מטריצה $A \in M_{m \times n}$ מתאימה למטריצה $B \in M_{m \times n}$ אם B קיימות מטריצות $U \in M_{m \times m}$, $V \in M_{n \times n}$ הפיכות כך ש- $A = UB V^{-1}$.

למעשה, פירוק SVD הוא התאמה אורתונורמלית ללכסינה, בדיוק כמו שפירוק ספקטרלי הוא דמיון אורתונורמלי ללכסינה (לכסון אורתונורמלי).

מסקנה 22. תהי $T: Q \rightarrow W$. אז קיימים B, C בסיסים אורתונורמליים כך ש- $[T]_C^B$ אלכסונית.

כדי להוכיח מסקנה זו, נשתמש בשורות U, V שיהיו את הבסיס האורתונורמלי הנדרש (עד לכדי העתקת קורדינאטות).

משפט 158. בהינתן B בסיס אורתונורמלי של V , והעתקה $T: V \rightarrow W$ כלשהי, σ ערך סינגולרי של T אם σ על האלכסון של Σ כאשר Σ המטריצה האלכסונית בפירוק SVD של $[T]_B$.

הוכחה. נסמן את פירוק ה-SVD של $[T]_B = U\Sigma V^T$ ב- $[T]_B = U\Sigma V^T$. אז ידוע $[TT^*]_B = U\Sigma^2 U^{-1}$ עבור U אורתונורמלית, ולכן $[TT^*]_B$ דומה ל- Σ^2 . עוד נבחין שכל ע"ע של Σ^2 אם Σ^2 מופיע על אלכסון Σ^2 אם Σ^2 מופיע על אלכסון Σ^2 . עתה נוכיח גרירה דו-כיוונית. אם σ ערך סינגולרי של T אז σ^2 הוא ע"ע של $[TT^*]$, ומהדמיון שהראנו הוא ע"ע של Σ^2 כלומר הוא מופיע על אלכסון Σ כדרוש. מהצד השני, אם σ מופיע על אלכסון Σ אז הוא ע"ע של Σ^2 ואז הוא ע"ע של $[TT^*]$, ומשום ש- Σ מוגדרת חיובית אז $\sigma \in \mathbb{R} \wedge \sigma \geq 0$ כדרוש.

מסקנה 23. מספר הערכים הסינגולריים הוא הממד של Σ והדרגה של $\text{rank } A$.

הערה 55. לבדיקת שפיות, נבחין שהערכים העצמיים של Σ הם אכן "מועמדים" להיות ערכים סינגולריים, שכן היא מטריצה נורמאלית ולכן הערכים העצמיים שלה ממשיים, וכן היא מוגדרת חיובית ולכן הערכים העצמיים שלה חיוביים.

משפט 159. בהינתן $T: V \rightarrow W$ העתקה, מתקיים:

$$\sqrt{\det(T^*T)} = \prod_{i=1}^n \sigma_i$$

כאשר $\sigma_1 \dots \sigma_n$ הערכים הסינגולריים של T .

הוכחה. ידוע של- T קיים פירוק SVD $T = U\Sigma V^T$ ממנו נסיק את הפירוק הספקטרלי הבא ל- T^*T הצמודה לעצמה:

$$T^*T = U\Sigma^2 U^T$$

אם T איננה הפיכה אז יש לה ערך סינגולרי 0, ו- T^*T איננה הפיכה (כי מכפלת לא הפיכות איננה הפיכה) וסיימנו. אם T הפיכה, את U הפיכה בהכרח. משום ש- U אוניטרית, $U^T = U^{-1}$. נפעיל את \det על שני האגפים ונקבל:

$$\det(TT^*) = \det(U) \det(\Sigma^2) \det(U^{-1}) = \det(UU^{-1}) \det(\Sigma)^2 = \det(\Sigma)^2 =: *$$

בגלל שהוכחנו ש- Σ מטריצה אלכסונית שעל האלכסון הערכים הסינגולריים של T , אז נקבל שוויון:

$$* = \left(\prod_{i=1}^n \sigma_i \right)^2$$

נוציא שורש ונקבל את הנדרש.

הערה 56. עבור T לא הפיכה,

מסקנה 24. עבור T ריבועית, נוכל לטעון:

$$\left(\prod_{i=1}^n \sigma_i \right) = \det(TT^*) = \det(T) \det(\bar{T}^T) = \det(T) \det(\bar{T}) = \det T \overline{\det T} = \det T^2$$

נוציא שורש ונקבל שהדטרמיננטה של T היא מכפלת הערכים הסינגולריים:

$$\prod_{i=1}^n \sigma_i = \det T$$

משפט 160 (פירוק העתקה לערכים סינגולריים). בהינתן $T: V \rightarrow W$ כלשהי, וערכים סינגולריים $\sigma_1 \dots \sigma_r$ כלשהם, אז קיימים $\mathbf{u}_1 \dots \mathbf{u}_r \in V$ ו- $\mathbf{v}_1 \dots \mathbf{v}_r \in W$ כך ש-

$$Tv = \sum_{i=1}^r \sigma_i \langle v | \mathbf{u}_i \rangle \mathbf{v}_i$$

הוכחה. נסמן $\dim V = n, \dim W = m$ בהינתן בסיסים \mathcal{B}, \mathcal{C} אורתונורמליים ל- V, W בהתאמה כך ש- $|\mathcal{B}| = n \wedge |\mathcal{C}| = m$. ידוע קיום פירוק של $[T]_{\mathcal{C}}^{\mathcal{B}}$ לערכים סינגולריים כך ש-

$$[T]_{\mathcal{C}}^{\mathcal{B}} = V \Sigma U^T$$

כאשר V, U אוניטריות ו- Σ אלכסונית. ממשפט ידוע שעל אלכסון Σ מופיעים $\sigma_1 \dots \sigma_n$. בגלל ש- V מטריצה עם r שורות ב- \mathbb{R}^m מהן נצמצם שורות בת"ל $V_1 \dots V_r$ ובאופן דומה U מטריצה עם שורות $W_1 \dots W_r$ ב- \mathbb{R}^n . נוכל להניח שהשורות הבת"ל במטריצות האוניטריות יהיו הראשונות, שכן הערכים הסינגולריים על המטריצה האלכסונית Σ מופיעים לפני שורות/עמודות האפסים (אם יש) ב- Σ . כעת נוכל להגדיר (כאשר $[\cdot]_{\mathcal{B}}^{-1}$ ההעתקה ההופכית לייצוג בבסיס \mathcal{B})

$$\mathbf{u}_i = [U_i]_{\mathcal{B}}^{-1} \quad \mathbf{v}_i = [V_i]_{\mathcal{C}}^{-1}$$

ועתה נשאר להראות שהבחירה שלנו אכן עובדת. יהי $v \in V$, ונסמן $[v]_{\mathcal{B}} = (a_1 \dots a_n)$. כאשר $\mathcal{E} = (e_1 \dots e_n)$ הבסיס הסטנדרטי ל- \mathbb{R}^n ו- $\mathcal{E} = (e_1 \dots e_m)$ הסטנדרטי ל- \mathbb{R}^m , נקבל:

$$\begin{aligned} [Tv]_{\mathcal{C}} &= [T]_{\mathcal{C}}^{\mathcal{B}} [v]_{\mathcal{B}} = V \Sigma U^T \cdot (a_1 \dots a_n) \\ &= \sum_{i=1}^n V \Sigma \overbrace{U^T e_i}^{U_i} a_i = V \Sigma \sum_{i=1}^r a_i U_i \\ &= V \Sigma \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^n a_i \langle e_j | U_i \rangle e_j \quad \leftarrow \text{ייצוג של } U_i \text{ ב-} \mathbb{R}^n \text{ בבסיס } \mathcal{E} \\ &= V \Sigma \sum_{i=1}^r \langle [v]_{\mathcal{B}} | U_i \rangle e_i \quad \leftarrow \text{לינאריות ברכיב הראשון} \\ &= \sum_{i=1}^r \langle [v]_{\mathcal{B}} | U_i \rangle \underbrace{V \Sigma e_i}_{(V e_i) \sigma_i = V_i \sigma_i} = \sum_{i=1}^r \sigma_i \langle [v]_{\mathcal{B}} | U_i \rangle V_i \end{aligned}$$

משום ש- \mathcal{B} בסיס אורתונורמלי, אז מעבר מבסיס \mathcal{E} ל- \mathcal{B} ולהפך הוא אוניטרי, כלומר $\langle [v]_{\mathcal{B}} | U_i \rangle = \langle [[v]_{\mathcal{B}}]_{\mathcal{B}}^{-1} | [U_i]_{\mathcal{B}}^{-1} \rangle$. כעת נפעיל את $[\cdot]_{\mathcal{B}}^{-1}$ על שני האגפים, ונקבל:

$$Tv = \left[\sum_{i=1}^r \sigma_i \langle v | \mathbf{u}_i \rangle V_i \right]_{\mathcal{B}}^{-1} = \sum_{i=1}^r \sigma_i \langle v | \mathbf{u}_i \rangle [V_i]_{\mathcal{B}}^{-1} = \sum_{i=1}^r \sigma_i \langle v | \mathbf{u}_i \rangle \mathbf{v}_i$$

כדרוש. ■

מסקנה 25. בהינתן $f_1 \dots f_r, g_1 \dots g_r$ לעיל, אז:

$$T^*v = \sum_{i=1}^r \sigma_i \langle v | \mathbf{v}_i \rangle \mathbf{u}_i$$

הוכחה. ניעזר פעמיים בלינאריות ברכיב הראשון:

$$\langle Tv | w \rangle = \left\langle \sum_{i=1}^r \sigma_i \langle v | \mathbf{u}_i \rangle \mathbf{v}_i \middle| w \right\rangle = \sum_{i=1}^r \sigma_i \langle v | \mathbf{u}_i \rangle \langle \mathbf{v}_i | w \rangle = \left\langle v \middle| \underbrace{\sum_{i=1}^r \sigma_i \langle \mathbf{v}_i | w \rangle \mathbf{u}_i}_{T^*w} \right\rangle^{\top}$$

8.4.3 נורמה של העתקה

הגדרה 90. הנורמה של העתקה $T: V \rightarrow W$ מממ"פים מוגדרת להיות:

$$\|T\| = \max\{\|Tv\| : v \in V \wedge \|v\| \leq 1\}$$

למה 15. כזכור, σ_1 הערך הסינגולרי המקסימלי של T . אז:

$$\|Tv\| \leq \sigma_1 \|v\|$$

הוכחה. מפירוק העתקה לערכים סינגולריים:

$$Tv = \sum_{i=1}^r \sigma_i \langle \sigma_i | \mathbf{u}_i \rangle \mathbf{v}_i$$

משום ש- \mathbf{v}_i אורתונורמליים, אז $\|\mathbf{v}_i\| = 1$. לכן:

$$\|Tv\| = \sum_{i=1}^n \sigma_i \langle v | \mathbf{u}_i \rangle \leq \sum_{i=1}^n \sigma_1 \langle v | \mathbf{u}_i \rangle = \sigma_1 \left(\sum_{i=1}^n \langle v | \mathbf{u}_i \rangle \right) =: *$$

ממשפט, בגלל ש- g_i בסיס אורתונורמלי אז $\sum_{i=1}^n \langle v | \mathbf{u}_i \rangle \mathbf{u}_i = v$. דהיינו בגלל ש- $\|g_i\| = 1$:

$$* = \sigma_1 \left\| \sum_{i=1}^n \langle v | \mathbf{u}_i \rangle \mathbf{u}_i \right\| = \sigma_1 \|v\|$$

וסה"כ אכן $\|Tv\| \leq \sigma_1 \|v\|$ כדרוש. ■

משפט 161. הנורמה של ההעתקה היא פונקציה חיובית ופחות או יותר לינארית:

$$\|T\| \geq 0 \quad .1$$

$$\|T\| = 0 \iff T = 0 \quad .2$$

$$\|\lambda T\| = |\lambda| \|T\| \quad .3$$

$$\|S + T\| = \|S\| + \|T\| \quad .4$$

$$\|T\| = \|T^*\| \quad .5$$

משפט 162. כאשר σ_1 הערך הסינגולרי הגדול ביותר של T , אז $\|T\| = \sigma_1$.

הערה 57. שני המשפטים הבאים לא טרואאליים אך מובאים כאן ללא הוכחה, לידע כללי בלבד.

משפט 163. בהינתן $T: V \rightarrow W$ ו- $\sigma_1 \dots \sigma_n$ ערכים סינגולריים, אז:

$$\min\{\|T - S\| : S \in V \rightarrow W \wedge \text{rank } S \leq k\} = \sigma_{k+1}$$

משפט 164 (משפט המיני-מקס). לכל $k \in [n]$, כאשר S מ"ו:

$$\sigma_k = \max_{\dim S=k} \min_{x \in S \wedge \|x\|=1} \|Tx\|$$

$$\sigma_k = \min_{\dim S=n-k+1} \underbrace{\max_{x \in S \wedge \|x\|=1} \|Tx\|}_{\|T|_S\|}$$

ובאופן שקול (ודי הגיוני):

באופן כללי, ערכים סינגולריים משמשים כדי להגדיר נורמות רבות על העתקות.

המשך בעמוד הבא

9 Common Algorithms.....9

בניגוד לפרק הבא, הפרק הזה לא מעניין בכלל. הוא מסכם בקצרה אלגוריתמים מועילים שרואים בתרגולים וכדאי לזכור (אין כאן סיכום מלא של התרגולים).

9.1 ~ אלגוריתמים מרכזיים

9.1.1 לכסון

שלבים: בהינתן $A \in M_n(\mathbb{F})$ מטריצה.

- נחשב את f_A
- נמצא את שורשי f_A . אם אנו מתקשים למצוא את שורשי הפולינום, נמצא את f^{red} .
- לכל λ_i , נמצא בסיס למרחב העצמי באמצעות חישוב $\mathcal{N}(\lambda_i I - A)$. איברי הבסיס יהיו ה"ע"ע בעבור ה"ע"ע λ_i .
- סה"כ $\text{diag}(\lambda_1 \dots \lambda_n)$ המטריצה האלכסונית המתקבלת ע"י מטריצת מעבר הבסיס הנתונה ע"י ה"ע"ע מהשלב הקודם.

9.1.2 גירדון

גירדון מטריצה כללית תהי $A \in M_n(\mathbb{F})$ מטריצה שהפולינום האופייני שלה $f_A(x) = \prod_{j=1}^m (x - \lambda_j)^{r_j}$ (בה"כ מתקיים מעל הרחבה לשדה סגור אלגברית). לכל $j \in [m]$ נבצע את הפעולות הבאות:

- נמצא את הפולינום $f_A(x)$ האופייני ונפרק אותו לכדי גורמים לינאריים.
- נחשב את $V_{\lambda_j}^{(i)} := \mathcal{N}((A - \lambda_j I)^{\ell_j})$ עד שנקבל $\dim(V_{\lambda_j}^{(\ell_j)}) = m_i$ (המרחב העצמי המוכלל).
- הערה: אפשר באופן חלופי לחשב את הפולינום המינימלי, שכן ראינו ש- m_i הריבוי של λ_i ב- $m_T(x)$.
- נחזור על האלגו' למציאת צורת ג'ורדן למטריצה נילפוטנטית:

- נגדיר $B_{\lambda_j} = \emptyset$

- לכל $i \in [\ell_j]$ נבצע:

* נמצא בסיס כלשהו של $V_{\lambda_j}^{(i-1)}$

* נוסיף ל- $C_{\lambda_j}^{(i)}$ את $B \cap (V_{\lambda_j}^{(i)} \setminus V_{\lambda_j}^{(i-1)})$

* נשלים את $C_{\lambda_j}^{(i)}$ לבסיס של $V_{\lambda_j}^{(i)}$. נסמן ב- $C_{\lambda_j}^{(i)+}$.

* נוסיף ל- B_{λ_j} את $\{(A - \lambda_j I)^k v \mid 0 \leq k < i, v \in C_{\lambda_j}^{(i)+}\}$

- נגדיר $B = \bigcup_{j=1}^m B_{\lambda_j}$ הבסיס המג'ורדן.

מציאת $J_n(\lambda)^m$: ידוע $J_n(\lambda) = \lambda I_n + J_n(0)$ ולכן מהיות $\lambda I, J_n(0)$ מתחלפות נקבל מנוסחת הבינום של ניוטון:

$$(J_n(\lambda)^m)_{ij} = \begin{cases} 0 & j > i \\ 0 & j < i - m \\ \binom{m}{i-j} \lambda^{m-(i-j)} & \text{else} \end{cases}$$

דהיינו:

$$J_n(\lambda)^m = \begin{pmatrix} \binom{m}{0} \lambda^m & & & & \\ \binom{m}{1} \lambda^{m-1} & \binom{m}{0} \lambda^m & & & \\ \vdots & \ddots & \ddots & & \\ \binom{m}{m} \lambda^0 & \binom{m}{m-1} \lambda^1 & \ddots & \ddots & \\ 0 & \binom{m}{m} \lambda^0 & \dots & \ddots & \binom{m}{0} \lambda^m \\ \vdots & 0 & \binom{m}{m} \lambda^0 & \dots & \binom{m}{m-1} \lambda^1 & \binom{m}{0} \lambda^m \\ 0 & \vdots & \ddots & \ddots & & \end{pmatrix}$$

9.1.3 אלגוריתם גראם-שמידט

נרצה למצוא בסיס אורתונורמלי/אורתוגונלי לממ"פ כלשהו. יהי בסיס $B = v_1 \dots v_n$ של V .

- **למציאת בסיס אורתוגונלי:** נגדיר לכל $i \in [n]$

$$\tilde{v}_i = v_i - \sum_{j=1}^{i-1} \frac{\langle v_i | \tilde{v}_j \rangle}{\langle \tilde{v}_j | \tilde{v}_j \rangle} \cdot \tilde{v}_j$$

ואז $(\tilde{v}_1 \dots \tilde{v}_n)$ בסיס אורתוגונלי (הבחנה: התהליך רקורסיבי, נתחיל מ- $i=1$ ונסיים ב- $i=n$). במידת הצורך נוכל לנרמל בסוף ע"י הגדרת:

$$\bar{v}_i = \frac{\tilde{v}_i}{\|\tilde{v}_i\|}$$

ואז $(\bar{v}_1 \dots \bar{v}_n)$ אורתונורמלי מסיבות ברורות.

- **מציאת בסיס אורתונורמלי:** (פחות יציב נומרית מאשר למצוא אורתונורמלי ואז לנרמל, אך יותר קל חישובית) נגדיר לכל $i \in [n]$

$$\bar{v}_i = \frac{1}{\|v_i\|} \left(v_i - \sum_{j=1}^{i-1} \langle v_i | \bar{v}_j \rangle \cdot \bar{v}_j \right)$$

בצורה זו נוכל לנרמל תוך כדי התהליך.

9.2 ~ מספר אלגוריתמים נוספים

- **אלגוריתם אוקלידס לתחום ראשי** (בפרט בעבור פולינומים):
- **נרמול וקטור:** נגדיר $v = \frac{v}{\|v\|}$ הוא v מנורמל.
- **בדיקת T -איוריאנטיות:** בהינתן B בסיס של $W \subseteq V$ נחשב את $T(B)$ ונבדוק האם $T(B) \subseteq W$ ע"י מעבר על כל איבר בסיס ודירוג.
- **חישוב A^{-1} , A^{n+c} באמצעות משפט קיילי-המילטון:** ידוע $f_A(A) = 0$, ואם נשאר גורם חופשי $\alpha_n A^n + \dots + \alpha_0 A^0 = 0$ אז נוכל להעביר אגפים ולקבל: $A^{-1} = \frac{1}{\alpha_0} \left(\sum_{k=1}^n \alpha_k A^{k-1} \right)$ ולכן $I = A^0 = A \left(\frac{\sum_{k=1}^n \alpha_k A^{k-1}}{\alpha_0} \right)$. כדי לחשב את A^{n+c} תחילה נחשב את A^n באמצעות העברת אגפים וקבלת $A^n = -\sum_{k=0}^{n-1} \alpha_k A^k$ (כי $\alpha_n = 1$ כי הפולינום מתוקן). עתה, נכפול ב- A^{-1} בדיוק c פעמים, ומשום שידוע A^n , בכל חלוקה שבא נקבל A^{n+1} נוכל להוציא גורם משותף ולקבל $A(A^n) = \sum_{k=1}^n \beta_k A^k$ ביטוי שהכפל הגבוהה ביותר בו תמיד A^{n-1} . סה"כ נוכל לבטא את A^{n+c} כקומבינציה לינארית של $I \dots A^{n-1}$, שעבור מספרי n קטנים קל לחשב.
- **ייצוג בבסיס אורתוגונלי:** לכל $u \in V$ בהינתן $(v_1 \dots v_n)$ בסיס אורתוגונלי, מתקיים $u = \sum_{i=1}^n \frac{\langle u | v_i \rangle}{\|v_i\|^2} \cdot v_i$ (אין צורך לחלק בנורמה בעבור אורתונורמלי).
- **מציאת היטל אורתוגונלי:** בהינתן $(u_1 \dots u_n)$ בסיס אורתוגונלי של U תמ"ו, אז $p_U(v) = \sum_{i=1}^k \frac{\langle v | u_i \rangle}{\|u_i\|^2} u_i$ (גם כאן אין צורך לחלק בנורמה בעבור בסיס אורתונורמלי).
- **מציאת ללכסון אוניטרי/אורתוגונלי** (אם קיים ממשפט הפירוק הספקטרלי):
 - נמצא את הע"ע של ההעתקה.
 - לכל ע"ע, נמצא בסיס עצמי של ו"ע ואז נבצע עליו בראש-שמידט כדי לקבל וקטורים אורתוגונליים/אורתונורמליים.
 - נשרשר את הבסיסים לקבלת בסיס אורתוגונלי/אורתונורמלי מלכסן.
- **מציאת פירוק SVD:** בהינתן T העתקה, נמצא את הפירוק הספקטרלי של TT^* , T^*T ומהזהויות $TT^* = U\Sigma^2U^T$ ו- $T^*T = V\Sigma^2V^T$ נקבל $T = U\Sigma V^T$.

המשך בעמוד הבא

Dual Spaces 10

10.1 ~ הגדרות בסיסיות

הגדרה 91. בהינתן V מ"ו מעל \mathbb{F} , נגדיר $V^* = \text{hom}(V, \mathbb{F})$.

הבה. אם $\dim V = n$ אז $\dim V^* = n$. לכן $V \cong V^*$. לא נכון במקרה הסוף ממדי.

למה 16. יהי $B = (v_i)_{i=1}^n$ בסיס ל- V . אז $\forall i \in [n]: \exists \psi_i \in V^*: \forall j \in [n]: \psi_i(v_j) = \delta_{ij}$

משפט 165. יהי V נ"ס ו- $B = (v_i)_{i=1}^n$ אז קיים ויחיד בסיס $B^* = (\psi_i)_{i=1}^n$ המקיים $\forall i, j \in [n]: \psi_i(v_j) = \delta_{ij}$.

הוכחה. נבחין שהבדרנו העתקה לינארית $\varphi: B \rightarrow V^*$ והיא מגדירה ביחידות $\psi: V \rightarrow V^*$ המקיימת את הנרש. ברור שהבנייה של φ_i קיימת ויחידה כי היא מוגדר לפי מה קורה לבסיס. נותר להוכיח שזה אכן בסיס. יהיו $\alpha_1 \dots \alpha_n \in \mathbb{F}$ כך ש- $\sum \alpha_i \psi_i = 0$. (האפס הזה הוא פונקציונל האפס). יהי $j \in [n]$. אז $0(v_j) = 0 = (\sum_{i=1}^n \alpha_i \psi_i)(v_j) = \sum_{i=1}^n \alpha_i \psi_i(v_j) = \sum_{i=1}^n \alpha_i \delta_{ij} = \alpha_j$.
 ■

נבחין שאפשר להגדיר:

הגדרה 92. $V^{**} = \text{hom}(V^*, \mathbb{F})$

ואכן $\dim V < \infty$ אז:

$$V \cong V^* \cong V^{**}$$

במקרה הזה, בניגוד לאיז' הקודם, יש איז' "טבעי" (קאנוני), כלומר לא תלוי באף בסיס.

משפט 166. קיים איזומורפיזם קאנוני בין V ל- V^{**} .

הוכחה. נגדיר את האיז' הבא:

$$\psi: V \rightarrow V^{**} \quad \psi(v) =: \bar{v} \quad \forall \psi \in V^*: \bar{v}(\psi) = \psi(v)$$

נוכיח שהוא איז':

• **ט"ל:** יהיו $v, u \in V, \alpha, \beta \in \mathbb{F}$. אז:

$$\psi(\alpha v + \beta u) = \overline{\alpha v + \beta u} \stackrel{!}{=} \alpha \bar{v} + \beta \bar{u}$$

נוכיח זאת:

$$\overline{\alpha v + \beta u}(\varphi) = \varphi(\alpha v + \beta u) = \alpha \varphi(v) + \beta \varphi(u) = \alpha v(\varphi) + \beta u(\varphi) = (\alpha \bar{v} + \beta \bar{u})(\varphi) = (\alpha \psi(v) + \beta \psi(u))(\varphi)$$

• **חח"ע:** יהי $v \in \ker \psi$. רוצים להראות $v = 0$.

$$\forall \varphi \in V^*: \bar{v}(\varphi) = 0 \implies \forall \varphi \in V^*: \varphi(v) = 0$$

אם v אינו וקטור האפס, נשלימו לבסיס $V = (v_i)_{i=1}^n$ ואם $\varphi_1 \dots \varphi_n$ בסיס הדואלי אז $\varphi_1(v) = 1$ אבל אז $0 = \bar{v}(\varphi_1) = 1$ וסתירה.

• **על:** משויון ממדים $\dim V^{**} = \dim V$.

■

כלומר, הפונקציונלים בדואלי השני הם למעשה פונקציונלים שלוקחים איזשהו פונקציונל בדואלי הראשון ומציבים בו וקטור קבוע.

10.2 ~ איזומורפיות למרחבי מכפלה פנימית

10.2.1 העתקה צמודה (דואלית)

סימון 18. לכל $v \in V$ ו- $\varphi \in V^*$ נסמן $\varphi(v) = (\varphi, v)$

הערה 58. סימון זה הגיוני משום שהכנסת וקטור לפונקציונל דואלי איזומורפי למכפלה פנימית.

משפט 167. יהיו V, W מ"וים נוצרים סופית מעל \mathbb{F} , $T: V \rightarrow W$. אז קיימת ויחידה $T^*: W^* \rightarrow V^*$ כך ש- $(\psi, T(v)) = (T^*(\psi), v)$.

אם לצייר דיאגרמה:

$$V \xrightarrow{T} W \cong W^* \xrightarrow{T^*} V^* \cong V$$

(תנסו לצייר את זה בריבוע, ש- V, W למעלה ו- V^*, W^* למטה, כדי להבין ויזואלית למה זה הופך את החצים) ברמה המטא-מתמטית, בתורת הקטגוריות, יש דבר שנקרא פנקטור – דרך לזהות בין אובייקטים שונים במתמטיקה. מה שהוא עושה, לדוגמה, זה להעביר את $\text{hom}(V, W)$ – מרחבים וקטרים סוף ממדיים – למרחב המטריצות. הדבר הזה נקרא פנקטור קוֹוֹרֵאיינְטִי. במקרה לעיל, זהו פנקטור קונטרא־ווריאנטי – שימוש ב- T^* הופך את החצים. (הרחבה של המרצה) אז אפשר להגדיר פנקטור אבל במקום זה נעשה את זה בשפה שאנחנו מכירים – לינארית 1. בהינתן $\psi \in W^*$, נרצה למצוא $T^*(\psi) \in V^*$. נגדיר:

$$T^*(\psi) = \psi \circ T$$

ברור מדוע $T^*: W^* \rightarrow V^*$. בעצם, זהו איזומורפיזם ("בשפת הפנקטורים") קאנוני. עוד קודם לכן ידענו (בגלל ממדים) שהם איזומורפים, אך לא מצאנו את האיזומורפיזם ולא ראינו שהוא קאנוני.

$$\tau: \text{hom}(V, W) \rightarrow \text{hom}(W^*, V^*) \quad \tau(T) = T^*$$

היא איזומורפיזם.

(הערה: תודה למרצה שנענה לבקשתי ולא השתמש ב- φ אחרי שעשיתי φ)

הוכחת לינאריות. יהיו $T, S \in \text{hom}(V, W)$, $\alpha \in \mathbb{F}$. אז:

$$\tau(\alpha T + S) = (T + \alpha S)^*$$

יהי $\psi \in W^*$, אז:

$$(T + \alpha S)^*(\psi) = \psi \circ (T + \alpha S)$$

יש למעלה פונקציונל ב- V^* . ננסה להבין מה הוא עושה על V . יהי $v \in V$:

$$\begin{aligned} [\psi(T + \alpha S)](v) &= \psi((T + \alpha S)v) \\ &= \psi(T)v + \alpha\psi(S)(v) = (\psi \circ T + \alpha\psi \circ S)(v) \\ &= ((T^* + \alpha S^*) \circ (\psi))(v) \\ &= (\tau(T) + \alpha\tau(S))(\psi)(v) \end{aligned}$$

סה"כ קיבלנו לינאריות:

$$\tau(T + \alpha S) = \tau(T) + \alpha\tau(S)$$

■

נוכל להוכיח זאת יותר בפשטות עם הנוטציה של "המכפלה הפנימית" שהגדרנו לעיל, (φ, v) . עתה נוכיח ש- τ לא רק לינארית, אלא מוגדרת היטב.

הוכחה.

• **חח"ע:** תהי $T \in \ker \tau$, אז $\tau(T) = T^* = 0_{\text{hom}(W^*, V^*)}$. נרצה להראות ש- T העתקה האפס. נניח בשלילה ש- $T \neq 0$. אז קיים $v' \in V$ כך ש- $T(v') \neq 0$. נשלימו לבסיס $(T(v) = w_1, w_2 \dots w_n)$ בסיס ל- W . יהי $(\psi_1 \dots \psi_n)$ הבסיס הדואלי. אז:

$$\tau(T)(\psi_1) = T^*(\psi_1) = \psi_1$$

אז:

$$0 = \tau(T)(\psi_1)(v') = T^*(\psi_1)(v') = \psi_1 \circ T(v') = \psi_1(w_1) = 1$$

סתירה. לכן $\ker \tau = \{0\}$ ולכן τ חח"ע.

• **על:** גם כאן משוויון ממדים

■

שאלה ממבחן שבן עשה. ("את השאלה הזו לא פתרתי בזמן המבחן, ואני די מתבייש כי אפשר לפתור אותה באמצעות כלים הרבה יותר פשוטים" "חה חה" "לא חח"ע זה חד-חד ערכי") יהיו V, W מ"ו מעל \mathbb{F} ו- $(w_1 \dots w_n)$ בסיס של W . תהי $T: V \rightarrow W$. הוכיחו שקיימים $\varphi_1 \dots \varphi_n \in V^*$ כך שלכל $v \in V$ מתקיים:

$$T(v) = \sum_{i=1}^n \varphi_i(v) w_i$$

שימו לב: בניגוד למה שבן עשה במבחן, V לא בהכרח נוצר סופית.

הוכחת ראש בקיר. לכל $v \in V$ קיימים ויחידים $\alpha_1 \dots \alpha_n$ כך ש- $T(v) = \sum_{i=1}^n \alpha_i w_i$. נגדיר $\varphi_i(v) = \alpha_i$. $\forall i \in [n]$. זה לינארי. ■

הוכחה "מתוחכמת". "אני אהבתי את ההוכחה שלי": נתבונן בבסיס הדואלי $B^* = (\psi_1 \dots \psi_n)$ שמקיים את הדלתא של קרונקר והכל. נגדיר $\varphi_i = T^*(\psi_i)$. יהי $v \in V$. קיימים ויחידים $\alpha_1 \dots \alpha_n$ כך ש- $T(v) = \sum_{i=1}^n \alpha_i w_i$. אז:

$$\sum_{i=1}^n \varphi_i(v) w_i = \sum_{i=1}^n T^*(\psi_i)(v) w_i$$

צ.ל. $\alpha_i = T^*(\psi_i)(v)$. אך נבחין שהגדרנו:

$$T^*(\psi_i)(v) = \psi_i(T(v)) = \psi_i\left(\sum_{j=1}^n \alpha_j w_j\right) = \alpha_i$$

■

"הפכת למרצה במתמטיקה כדי להתנקם באחותך?" "כן".

10.2.2 המאפס הדואלי ומרחב אורתוגונלי

הגדרה 93. יהי V מ"ו נוצר סופית. יהי $S \subseteq V$ קבוצה. נגדיר $S^0 \subseteq V^*$ $S^0 = \{\varphi \in V^* \mid \forall v \in S: \varphi(v) = 0\}$. **דוגמאות.** $\{0\}^0 = V^*, V^0 = \{0\}$

משפט 168.

1. S^0 תמ"ו של V^* .

2. $(\text{span } S)^0 = S^0$

3. $S \subseteq S' \implies S'^0 \subseteq S^0$

משפט 169. יהי V נ"ס, $U \subseteq V$ תמ"ו. אז $\dim U + \dim U^0 = n$

באופן דומה אפשר להמשיך ולעשות:

$$\dim U^0 + \dim U^{**} = n$$

וכן:

$$U \cong U^{**}$$

איזומורפיזם קאנוני. זאת כי:

$$\forall \varphi \in U^0 \forall u \in U: \varphi(u) = 0$$

ומי אלו הוקטורים שיאפסו את φ שמאפס את u ? הוקטורים ב- U עד לכדי האיזומורפיזם הקאנוני מ- U ל- U^{**} . נבחין ש-:

$$[T^*]_{\mathcal{A}^*}^{\mathcal{B}^*} = ([T]_{\mathcal{B}}^{\mathcal{A}})^T$$

כאשר \mathcal{A} בסיס ל- V , \mathcal{A}^* ל- V^* , \mathcal{B} ל- W , \mathcal{B}^* ל- W^* .

"כוס אמא של קושי" - בן על זה שקושי גילה משפט כלשהו לפניו.

.....

סוף הקורס ~ 2025B

מאת שחר פרץ

קומפל ל- \LaTeX ונוצר באמצעות תוכנה חופשית בלבד