תוכן עניינים

1 מטריצות בסיסיות

1.1 כפל מטריצה במטריצה

הגדרה 1.1 יהא R חוג ויהיו $A \in M_{n\times m}(R), B \in M_{m\times p}(R)$ מטריצות. נגדיר כפל מטריצות $(A\cdot B) \in M_{p\times n}(R)$ בצורה הבאה:

$$(A\cdot B)_{i,j} = \sum_{k=1}^{n} a_{i,k}\cdot b_{k,j}$$

1.1.1 טענות לגבי כפל מטריצות:

משפט 2.1
$$A\cdot B = \begin{pmatrix} | & | & | \\ A\cdot C_1(B) & \cdots & A\cdot C_n(B) \\ | & | & | \end{pmatrix}.$$

משפט 3.1
$$A\cdot B = \begin{pmatrix} - & R_1(A)\cdot B & - \\ & \vdots & \\ - & R_n(A)\cdot B & - \end{pmatrix}.$$

1. **אסוציאטיביות הכפל:** $(A\cdot B)\cdot C = A\cdot(B\cdot C)$.
2. **חוק הפילוג.**
3. **הוצאת סקלר:** $A\cdot(\alpha\cdot B) = \alpha\cdot(A\cdot B)$.
4. **כפל ב־0 וב־1:** $A \in M_{m\times n}(\mathbb{F})$, $A\cdot 0 = 0\cdot A = 0$ ו־$A\cdot I_n = A$, $I_m\cdot A = A$.

1.2 פעולות אלמנטריות

1. להחליף סדר בין משוואות. $R_i \leftrightarrow R_j$.
2. להכפיל משוואה בקבוע. $R_i \to \alpha\cdot R_i$.
3. לחבר משוואות. $R_i \to R_i + R_j$.

כולן משמרות את הפתרונות של המטריצה, ואת המרחב $R(A)$ ואת $\text{rank}(A)$.

משפט 4.1 יהיו A, B מטריצות כך ש־$A\cdot B$ מוגדר, ותהא φ פעולה אלמנטרית. אזי:

$$\varphi(A\cdot B) = \varphi(A)\cdot B$$

הגדרה 5.1 המטריצה האלמנטרית: לכל פעולה אלמנטרית φ על מטריצות עם m שורות, נגדיר מטריצה אלמנטרית E_φ על ידי $E_\varphi := \varphi(I_m)$.

לכל מטריצה $A \in M_{m\times n}(\mathbb{F})$, ופעולה אלמנטרית φ, מתקיים ש־$\varphi(A) = E_\varphi\cdot A$.

בנוסף מטריצות אלמנטריות הפיכות, והמטריצה של הפעולה ההופכית של φ היא $(E_\varphi)^{-1}$.

2 דירוג ודירוג קנוני

בצורה מדורגת:

1. משוואות 0 (מהצורה $0 = b$) נמצאות למטה.
2. המשתנה הפותח בכל משוואה נמצא מימין ממש למשתנים הפותחים במשוואות מעליו.

<u>משתנה חופשי</u> הוא משתנה שלא מקדם פותח של אף שורה.

בנוסף, בצורה מדורגת קנונית:

3. המקדם של כל משתנה פותח הוא 1
4. לכל משתנה פותח של משוואה, המקדם של המשתנה בשאר המשוואות הוא 0.

לכל מטריצה קיימת צורה מדורגת קנונית **יחידה** ששקולה לה.

3 בוחן תת מרחב

$U\subseteq F^n$ היא תת מרחב אמ"מ:

1. U סגורה לחיבור.
2. U סגורה לכפל בסקלר.
3. $\bar{0}\in U$. ניתן להחליף את התנאי ב־$U\neq\emptyset$.

נובע מכאן גם שחיתוך של תתי מרחבים הוא תת מרחב.

4 צירופים לינאריים

הגדרה 1.4 סדרת mיות $(\overline{v_1},\dots,\overline{v_k})\in(\mathbb{F}^m)^k$ תקרא בלתי תלויה לינארית (בת"ל) אם לכל $\bar{b}\in\mathbb{F}^m$ יש לכל היותר פתרון אחד למשוואה $\sum_{i=1}^k x_i\overline{v_i}=\bar{b}$.

משפט 2.4 סדרת וקטורים $(v_1,\dots,v_m)\subseteq\mathbb{F}^n$ בלתי תלויה לינארית $\iff$ כל איבר אינו צירוף לינארי של קודמיו.

הגדרה 3.4 נגדיר את מרחב התלויות של $(\overline{v_1},\dots,\overline{v_k})$ להיות:

$$LD\left((\overline{v_1},\dots,\overline{v_k})\right)=\left\{\begin{pmatrix}\alpha_1\\ \vdots\\ \alpha_n\end{pmatrix}\in\mathbb{F}^n\mid \alpha_1\overline{v_1}+\dots+\alpha_k\overline{v_k}=0\right\}$$

בנוסף $\overline{v_1},\dots,\overline{v_k}$ בת"ל $\iff$ $LD\left(\overline{v_1},\dots,\overline{v_k}\right)=\{0\}$.

4.1 בסיס

הגדרה 4.4 (משפט 2 מתוך 3) יהי $\mathbb{F}$ שדה, B תת קבוצה של $\mathbb{F}^n$. אז B נקראת בסיס של $\mathbb{F}^n$ אם שניים מהתנאים הבאים מתקיימים:

1. B בת"ל.
2. B פורשת את $\mathbb{F}^n$.
3. $m=n$.

כל שניים מוכיחים גם את השלישי.

התנאים הבאים שקולים לכך ש־B בסיס:

1. בת"ל מקסימלית - B בת"ל וכל קבוצה המכילה ממש את B הינה תלויה לינארית.
2. פורשת מינימלית - B פורשת וכל קבוצה שמוכלת ממש ב־B אינה פורשת.
3. לכל $v\in\mathbb{F}^n$ יש הצגה יחידה כצירוף של וקטורים מ־B.

4.1.1 למת ההחלפה של ריס

יהי V מ"ו, ותהא $(v_1,\dots,v_n)$ סדרה פורשת ב־V, ו־$(u_1,\dots,u_m)$ סדרה בת"ל. אזי:

1. קיימים $1\le i_1<i_2<\dots<i_m\le n$ כך ש־$(u_1,\dots,u_m)\frown(v_j\mid j\notin\{i_1,\dots,i_m\})$ פורשת.
2. $m\le n$.

כלומר אפשר להחליף איברים כלשהם של סדרה פורשת באיבריה של כל סדרה בת"ל.

5 שחלוף והפיכות (A^{-1},A^T)

נגדיר את השחלוף של A, A^T, להיות המטריצה כך ש־$\left(A^T\right)_{i,j}=A_{j,i}$. אם $A=A^T$, נגיד ש־A סימטרית.

משפט 1.5 חוקי Transpose:

- **חיבור:** $(A+B)^T=A^T+B^T$ (אם החיבור מוגדר).
- **כפל בסקלר:** $(\alpha A)^T=\alpha\left(A^T\right)$.
- $(A\cdot B)^T=B^T\cdot A^T$.

הגדרה 2.5 מטריצה $A\in M_{m\times n}(\mathbb{F})$ תיקרא:

1. **הפיכה משמאל:** אם קיימת מטריצה $B\in M_{n\times m}(\mathbb{F})$ כך ש־$B\cdot A=I_n$.
2. **הפיכה מימין:** אם קיימת מטריצה $B\in M_{n\times m}(\mathbb{F})$ כך ש־$A\cdot B=I_m$.
3. **הפיכה:** אם קיימת מטריצה $B\in M_{n\times m}(\mathbb{F})$ כך ש־$A\cdot B=I_m$ וגם $B\cdot A=I_n$. קיימת הופכית יחידה.

משפט 3.5 תהא $A\in M_{m\times n}(\mathbb{F})$.

1. A הפיכה משמאל $\iff$ למערכת $A\cdot\bar{x}=0$ יש פתרון יחיד (כלומר סדרת העמודות של A בת"ל, ולכן $m\ge n$).
2. A הפיכה מימין $\iff$ למערכת $A\cdot\bar{x}=\bar{b}$ יש פתרון לכל $\bar{b}\in\mathbb{F}^m$ (כלומר סדרת העמודות של A פורשת, ו־$m\le n$).
3. A הפיכה $\iff$ למערכת $A\cdot\bar{x}=\bar{b}$ יש פתרון יחיד לכל $\bar{b}\in\mathbb{F}^m$ (כלומר סדרת העמודות של A בסיס, ולכן $m=n$).
   בפרט מטריצה הפיכה היא ריבועית.

טענות:

1. אם במטריצה $A\in M_{m\times n}(\mathbb{F})$ יש שורת אפסים אז A לא הפיכה מימין.
2. אם A הפיכה A^T הפיכה.
3. $\left(A^T\right)^{-1}=\left(A^{-1}\right)^T$.
4. אם $A\in M_{m\times k}(\mathbb{F}),B\in M_{k\times n}(\mathbb{F})$ הפיכות, אז $A\cdot B$ הפיכה ו־$(A\cdot B)^{-1}=B^{-1}\cdot A^{-1}$.

5.1 תנאים שקולים להפיכות במטריצה ריבועית

1. A שקולת שורות ל־I_n.
2. קיים $\bar{b}\in\mathbb{F}^n$ כך שלמערכת $A\bar{x}=\bar{b}$ יש פתרון יחיד.
3. לכל $\bar{b}\in\mathbb{F}^n$ למערכת $A\bar{x}=\bar{b}$ יש פתרון יחיד.
4. A הפיכה משמאל - כלומר עמודות A בת"ל. אפשר גם שורות לפי 6.
5. A הפיכה מימין - כלומר עמודות A פורשות. אפשר גם שורות לפי 6.
6. A^T הפיכה.

ובנוסף A,B ריבועיות והפיכות $\iff$ $A\cdot B$ הפיכה.

6 דטרמיננטה

6.1 דרכי חישוב

1. פיתוח לפי עמודה: $\det_j^{(n)}(A) = \sum_{k=1}^{n} (A)_{k,j} \cdot (-1)^{k+j} \cdot \det^{(n-1)}\left(A_{(k\,j)}\right)$.
2. דטרמיננטה לפי תמורות: $\det(A) = \sum_{\sigma\in S_n} \operatorname{sign}(\sigma) \cdot \prod_{i=1}^{n} (A)_{i,\sigma(i)}$.
3. אם A לא הפיכה אז $\det(A) = 0$. ואם A הפיכה אז $\det(A) \neq 0$ ו־$\det(A) = x_{\varphi_1} \cdot \dots \cdot x_{\varphi_n}$ כאשר $\varphi_1, \dots, \varphi_n$ פעולות הדירוג. אם φ החלפת שורה $x_\varphi = -1$, אם φ כפל בסקלר λ אז $x_\varphi = \lambda^{-1}$, ואם φ הוספת שורה אז 1.

6.2 טענות

1. לינאריות לפי שורה:

$$\det\begin{pmatrix} -A_1- \\ \vdots \\ -\alpha \cdot B + \beta \cdot C- \\ \vdots \\ -A_n- \end{pmatrix} = \alpha \cdot \det\begin{pmatrix} -A_1- \\ \vdots \\ -B- \\ \vdots \\ -A_n- \end{pmatrix} + \beta \cdot \det\begin{pmatrix} -A_1- \\ \vdots \\ -C- \\ \vdots \\ -A_n- \end{pmatrix}$$

2. נרמול: $N(I) = 1$.
3. $\det(A \cdot B) = \det(A) \cdot \det(B)$.
4. $\det(A) = \det\left(A^T\right)$. לכן אפשר גם להפעיל פעולות עמודה, שהן פעולות שורה על השחלוף.
5. במטריצה משולשית עליונה או תחתונה ($\forall j > i. (A)_{i,j} = 0$ או $\forall i < j. (A)_{i,j} = 0$), הדטרמיננטה היא מכפלת האלכסון.

6.3 מטריצת ונדרמונד

עבור מטריצה מהצורה הבאה:

$$V = \begin{pmatrix} 1 & \alpha_1 & \alpha_1^2 & \dots & \alpha_1^{n-1} \\ 1 & \alpha_2 & \alpha_2^2 & \dots & \alpha_2^{n-1} \\ 1 & \alpha_3 & \alpha_3 & \dots & \alpha_3^{n-1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & \alpha_m & \alpha_m^2 & \dots & \alpha_m^{n-1} \end{pmatrix}$$

אז הדטרמיננטה היא $\det(V) = \prod_{1\le i<j\le n} (\alpha_j - \alpha_i)$.

6.4 מטריצה מוצמדת

נגדיר: $(\operatorname{adj}(A))_{i,j} = (-1)^{j+i} \cdot \det\left(A_{(j\,i)}\right)$.
מתקיים:

1. $(\operatorname{adj}(A))^T = \operatorname{adj}\left(A^T\right)$.
2. אם A לא הפיכה אז: מטריצת האפס $= A \cdot \operatorname{adj}(A) = \operatorname{adj}(A) \cdot A$.
3. $A \cdot \operatorname{adj}(A) = I \cdot \det(A)$. אז $A^{-1} = \frac{1}{|A|} \cdot \operatorname{adj}(A)$.

6.5 כלל קרמר

תהא $A \in M_n(\mathbb{F})$ הפיכה, אז לכל $\bar{b} \in \mathbb{F}^n$ למערכת $A\bar{x} = \bar{b}$ יש פתרון יחיד והפתרון הינו: (שתי דרכים לתאר אותו)

1. $c = A^{-1} \cdot \bar{b}$.
2. $c_j = \frac{|B_j|}{|A|}$ כאשר $B_j\left(C_1(A), \dots, C_{j-1}(A), \bar{b}, \dots, C_n(A)\right)$.

7 תמורות

7.1 הגדרות

פורמלית, S_n זה קבוצת הפונקציות החח"ע ועל ב־$J_n \to J_n$ כאשר $J_n = \{1, \dots, n\}$.
סימונים לתמורות:

1. $\sigma : J_n \to J_n$ חח"ע ועל.
2. רישום ישיר: $\begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 \\ \sigma(1) & \sigma(2) & \sigma(3) & \sigma(4) \end{pmatrix}$.

הגדרה 1.7 (מטריצה תמורה): מטריצה $A \in M_n(\mathbb{F})$ נקראת מטריצת תמורה אם קיימת תמורה $\sigma \in S_n$ כך ש־$P(\sigma) = A = \begin{pmatrix} | & & | \\ e_{\sigma(1)} & \dots & e_{\sigma(n)} \\ | & & | \end{pmatrix}$.

7.2 סיגנטורה sign

הגדרה 2.7 עבור $\sigma \in S_n$, $\operatorname{sign}(\sigma)$ (הסיגנטורה של σ) מוגדרת כ־$\operatorname{sign}(\sigma) = |P(\sigma)|$.

הגדרה שקולה: תהא $\sigma \in S_n$ תמורה. לכל $1 \le i \le n$ נגדיר את $N(\sigma) = |\{(i,j) \mid j > i \wedge \sigma(j) < \sigma(i)\}|$ ו־$z_\sigma(i) = |\{(i,j) \mid j > i, \sigma(i) < \sigma(j)\}|$ (ו־$N(\sigma) = \sum_{i=1}^{n} z_\sigma(i)$). נגדיר את sign להיות: $\operatorname{sign}(\sigma) = (-1)^{N(\sigma)}$.

משפט 3.7 $\operatorname{sign}(\sigma\tau) = \operatorname{sign}(\sigma) \cdot \operatorname{sign}(\tau)$.

8 מרחב וקטורי

הגדרה 1.8 (מרחב וקטורי): מרחב וקטורי מעל שדה $\mathbb{F}$ זו שלשה $(V, +, \cdot)$ כך ש:

1. $\langle V, + \rangle$ חבורה חילופית.
2. $\cdot : \mathbb{F} \times V \to V$ כפל בסקלר, פעולה שמקיימת:
   (א) אסוצייטיביות. $\forall \alpha, \beta \in \mathbb{F}. \forall \bar{v} \in V. \beta \cdot (\alpha \cdot \bar{v}) = (\beta \cdot \alpha) \cdot v$.
   (ב) $\forall \bar{v} \in V. 1_{\mathbb{F}} \cdot \bar{v} = \bar{v}$.
3. חוק הפילוג:
   (א) $\forall \alpha, \beta \in \mathbb{F}. \forall \bar{v} \in V. (\alpha + \beta) \cdot \bar{v} = \alpha \cdot \bar{v} + \beta \cdot \bar{v}$.
   (ב) $\forall a \in \mathbb{F}. \forall \overline{v_1}, \overline{v_2} \in V. \alpha \cdot (\overline{v_1} + \overline{v_2}) = \alpha \cdot \overline{v_1} + \alpha \cdot \overline{v_2}$.

9 בסיס האמל

- תת קבוצה $X \subseteq V$ נקראת בת"ל אם לכל $v_1, \ldots, v_n \in X$, $v_1, \ldots, v_n$ בת"ל. כלומר אין צירוף לינארי לא טריויאלי של איברים מ־X שיוצא 0.
- תת קבוצה $X \subseteq V$ נקראת פורשת אם $\text{sp}(X) = V$.
- קבוצה $X \subseteq V$ נקראת בסיס האמל אם היא בת"ל ופורשת.

10 מימד

הגדרה 1.10 (מימד): יהי V מ"ו מעל $\mathbb{F}$ בעל בסיס, המימד של V הינו עוצמת בסיס כלשהו (והמימד יחיד). מסמנים כ־$\dim_{\mathbb{F}}(V)$.

משפט 2.10 (משפט המימדים הראשון):

$$\dim(U_1 + U_2) = \dim(U_1) + \dim(U_2) - \dim(U_1 \cap U_2)$$

מסקנה: אם $U \subseteq V$ ו־$\dim U = \dim V$, אז $U = V$.

משפט 3.10 (משפט המימדים השני): עבור $T : V \to U$,

$$\dim(V) = \dim(\ker(T)) + \dim(Im(T))$$

11 סכום ישר

הגדרה: נאמר כי $U_1 + \cdots + U_n$ הוא סכום ישר $U_1 \oplus \cdots \oplus U_n$ אם לכל $\overline{v} \in U_1 + \cdots + U_n$ קיימת ויחידה סדרה $\overline{u_1}, \ldots, \overline{u_n} \in U_i$ כך ש־$\overline{v} = \sum_{i=1}^{n} \overline{u_i}$. נקרא גם הצגה יחידה.

משפט האיפיון: יהיו $U_1, \ldots, U_n \subseteq U$ תמ"ו, הבאים שקולים:

1. $U_1 \oplus \cdots \oplus U_n$.
2. לכל סדרות בת"ל B_i ב־U_i, השרשור $B_1 \frown B_2 \frown \cdots \frown B_n$ בת"ל.
3. לכל $1 \le i \le n$, $U_i \cap \left(\sum_{j=1, j\neq i}^{n} U_j\right) = \{\overline{0}\}$.

   בפרט אם $n = 2$, $U_1 \cap U_2 = \{\overline{0}\}$.

12 מרחב העמודות והשורות

הגדרה: תהא $A \in M_{m\times n}(\mathbb{F})$, נגדיר:

1. מרחב הפתרונות: $\text{Sols}(A) = \left\{x \in \mathbb{F}^n \mid Ax = \overline{0}\right\}$.
2. מרחב העמודות: $C(A) = \text{sp}(C_1(A), \ldots, C_n(A))$.
3. מרחב השורות: $R(A) = \text{sp}(R_1(A), \ldots, R_m(A))$.

משפט 1.12 $\dim(R(A)) = \dim(C(A))$. יסומן גם כ־$\text{Rank}(A)$.

בנוסף נסמן $\mathcal{N}(A) = \dim(\text{Sols}(A))$.

משפט 2.12 (משפט הדרגה): פעולות דירוג משמרות את $R(A)$ (ולכן גם את $\text{Rank}(A)$), אבל לא בהכרח משמרות את $C(A)$.

(משפט הדרגה והאפסות): $\text{Rank}(A) + \mathcal{N}(A) = n$.

מסקנה: A הפיכה $\iff$ $\text{Rank}(A) = n$.

חוקי rank: לכל מטריצה $A \in M_{m\times n}(\mathbb{R})$,

1. $\text{Rank}(A) \le \min(n, m)$.
2. $\text{Rank}(A \cdot B) \le \min(\text{Rank}(A), \text{Rank}(B))$.
3. $\text{Rank}(A + B) \le \text{Rank}(A) + \text{Rank}(B)$.
4. אם A הפיכה אז $\text{Rank}(A \cdot B) = \text{Rank}(B), \text{Rank}(B \cdot A) = \text{Rank}(B)$ (אם מוגדר).

13 העתקות לינאריות

הגדרה: יהיו V, U מ"ו מעל $\mathbb{F}$, נאמר כי $T : V \to U$ העתקה לינארית אם:

1. חיבוריות - $\forall v_1, v_2 \in V. T(v_1 + v_2) = T(v_1) + T(v_2)$.
2. הומוגניות - $\forall \alpha \in \mathbb{F}. \forall v \in V. T(\alpha \cdot v) = \alpha \cdot T(v)$.

הגדרות נוספות:

1. $\ker(T) = T^{-1}[\{0\}] = \{\overline{v} \in V \mid T(\overline{v}) = 0\}$ הגרעין של T, kernel.
2. $Im(T) = \{T(\overline{v}) \mid \overline{v} \in V\} \subseteq U$ התמונה של T.

בנוסף $\ker(T), Im(T)$ תמ"ו של T.

13.1 תכונות בסיסיות

תהא $T : V \to U$ לינארית,

1. $T\left(\sum_{i=1}^{n} \alpha_i v_i\right) = \sum_{i=1}^{n} \alpha_i T(v_i)$ - כל צירוף לינארי נשמר.
2. $T(-\overline{v}) = -T(\overline{v})$ - מכפליות.
3. $T(\overline{0}_V) = \overline{0}_U$.
4. T חח"ע $\iff$ $\ker(T) = \{\overline{0}\}$.
5. T על $\iff$ $\text{Im}(T) = U$ (טריויאלי).
6. אם $(u_1, \ldots, u_n)$ סדרה פורשת של V אז $(T(u_1), \ldots, T(u_k))$ סדרה פורשת של $Im(T)$.
7. עבור $(v_1, \ldots, v_n)$, $LD(v_1, \ldots, v_n) \subseteq LD(T(v_1), \ldots, T(v_n))$. לכן:

   (א) אם $(T(v_1), \ldots, T(v_n))$ בת"ל אז $(v_1, \ldots, v_n)$ בת"ל.

   (ב) אם $v_i \in \text{sp}(v_1, \ldots, v_{i-1}, v_{i+1}, \ldots, v_n)$ אז גם $T(v_i) \in \text{sp}(T(v_1), \ldots, T(v_{i-1}), T(v_{i+1}), \ldots, T(v_n))$.

   (ג) אם T חח"ע, אז $LD(T(v_1), \ldots, T(v_n)) = LD(v_1, \ldots, v_n)$.

   אם T על, אז T מעבירה סדרה פורשת של V לסדרה פורשת של U.

8. יהיו V,U מ"ו. יהי $B=(b_1,\dots,b_n)$ בסיס של V. יהיו $u_1,\dots,u_n\in U$ וקטורים כלשהם. אז קיימת ויחידה העתקה לינארית $T:V\to U$ כך שלכל $1\leq i\leq n$, $T(b_i)=u_i$. כלומר העתקה לינארית נקבעת ביחידות לפי $\dim(V)$ איברים.

משפט המימדים השני: $\dim(V)=\dim(\ker(T))+\dim(Im(T))$.

13.2 הטלה

יהי V מ"ו, ו־$U,W\subseteq V$ תמ"ו כך ש־$V=U\oplus W$. ראינו כי כל וקטור $\overline{v}\in V$ ניתן להציג באופן יחיד:

$$\overline{v}=\overline{u}+\overline{w},\overline{u}\in U,\overline{w}\in W$$

נגדיר את ההטלה של V על U:

$$P_{(U,W)}:V\to U$$
$$P_{(W,U)}:V\to W$$
$$P_{(U,W)}(\overline{v})=\iota x\in U.\exists y\in W.\overline{v}=x+y$$

כלומר זה ייצוג לאחד מהאיברים בהצגה היחידה של וקטור.

טענות:

1. הטלה $P_{(U,W)}$ היא העתקה לינארית.
2. $P_{(U,W)}\circ P_{(U,W)}=P$, $P_{(U,W)}+P_{(W,U)}=Id_V$.
3. $\mathrm{Im}\left(P_{(U,W)}\right)=U$, $P_{(U,W)}^{-1}[\{0\}]=W$.

13.3 איזומורפיזם

13.3.1 הגדרות

הגדרה: יהיו V,U מ"ו מעל $\mathbb{F}$, נאמר כי $f:V\to U$ היא איזומורפיזם של מ"ו אם:

1. f חח"ע ועל.
2. f העתקה לינארית (חיבורית והומוגנית).

איזומורפיזם משמר את הפתרונות של $v=\sum_{i=1}^{n}x_i\overline{u_i}$ כאשר $v,\overline{u_1},\dots,\overline{u_n}\in V$.

שני מרחבים וקטוריים מעל אותו שדה נקראים <u>איזומורפיים</u> ומסומנים $U\simeq V$ אז קיים איזומורפיזם $T:V\to U$. זה "יחס שקילות".

משפט: יהיו V,U מ"ו נוצרים סופית, אז $V\simeq U\iff\dim(V)=\dim(U)$.

משפט 1.13 (2 מתוך 3 להעתקות לינאריות): כל 2 מתוך 3 הבאים שקולים לכך ש־T איזומורפיזם.

1. $\dim(V)=\dim(U)$.
2. T חח"ע.
3. T על.

13.3.2 קואורדינטות

יהי V מ"ו מעל $\mathbb{F}$, B בסיס של V. נסמן $\dim V=n$, ויהי $B=(b_1,\dots,b_n)$ בסיס. על פי משפט, לכל $\overline{v}\in V$ קיימים ויחידים $\alpha_1,\dots,\alpha_n\in\mathbb{F}$ כך ש־$v=\sum_{i=1}^{n}\alpha_i b_i$. נגדיר את הקואורדינטות של $\overline{v}$ לפי B להיות:

$$[\overline{v}]_B=\begin{pmatrix}\alpha_1\\ \vdots\\ \alpha_n\end{pmatrix}\in\mathbb{F}^n$$

זה איזומורפיזם מ־V ל־$\mathbb{F}^n$. העתקת הקואורדינטות תסומן גם בתור $[\cdot]_B:V\to\mathbb{F}^n$.

13.4 מרחב ההעתקות

הגדרה: $\mathrm{Hom}(V,U)=\left\{T\in U^V\mid \text{T is linear}\right\}$ מרחב ההעתקות. זה תת מרחב של $\langle U^V,+,\cdot\rangle$.

משפט: $\dim(\mathrm{Hom}(V,U))=\dim(V)\cdot\dim(U)$ ־ זה נכון אפילו אם V,U לא נוצרים סופית.

13.5 מטריציונית

הגדרה: לכל מטריצה $A\in M_{m\times n}(\mathbb{F})$, נגדיר את ההעתקה המטריציונית המתאימה ל־A, $T_A:\mathbb{F}^n\to\mathbb{F}^m$:

$$T_A(\overline{v})=A\overline{x}$$

פונקציה f נקראת מטריציונית אם קיימת מטריצה $A\in M_{m\times n}(\mathbb{F})$ כך ש־$f=T_A$, ונסמן $A=[f]$.

השיטה למצוא את המטריצה $[T]$ היא:

$$[T]=\left(T\begin{pmatrix}1\\0\\ \vdots\\0\end{pmatrix}\quad T\begin{pmatrix}0\\1\\ \vdots\\0\end{pmatrix}\quad\dots\quad T\begin{pmatrix}0\\ \vdots\\0\\1\end{pmatrix}\right)$$

משפט: תהא $T:\mathbb{F}^n\to\mathbb{F}^m$, אזי T העתקה לינארית $\iff$ T מטריציונית.

טענות:

1. $\mathrm{Sols}(A)=T_A^{-1}\left[\{\overline{0}\}\right]=\ker(T_A)$.
2. $C(A)=Im(T_A)$.
3. T_A על $\iff$ עמודות A פורשות. אם היא ריבועית אז גם הפיכה.
4. T_A חח"ע $\iff$ עמודות A בת"ל. כי אין שתי דרכים להגיע לאותו הדבר.
5. T_A הפיכה $\iff$ עמודות A בסיס $\iff$ A הפיכה.
6. $[T+S]=[T]+[S]$, $[\alpha\cdot T]=\alpha\cdot[T]$, $[S\circ T]=[S]\cdot[T]$.

14 מטריצה מייצגת

הגדרה: תהא $T:V\to U$ צ"ל V,U נוצר סופית. יהי B בסיס של V, ו־C בסיס של U. נגדיר את ההעתקה המייצגת $T_C^B:\mathbb{F}^{\dim(V)}\to\mathbb{F}^{\dim(U)}$:

$$T_C^B=Q_C\circ T\circ Q_B$$
$$[T]_C^B=\left[T_C^B\right]$$

טענות:

1. $C_i\left(\left[T_C^B\right]\right) = T_C^B\left(e_i\right)$.

כלומר $[T]_C^B = \begin{pmatrix} | & & | \\ \left[T\left(b_1\right)\right]_C & \cdots & \left[T\left(b_n\right)\right]_C \\ | & & | \end{pmatrix}$.

2. $[T]_C^B \cdot [v]_B = [T(v)]_C$.
3. לכל $\overline{v} \in V$, $\overline{v} \in \ker(T) \iff [\overline{v}]_B \in \text{Sols}\left([T]_C^B\right)$.
4. לכל $\overline{u} \in U$, $\overline{u} \in Im(T) \iff [\overline{u}]_C \in \text{Cols}\left([T]_C^B\right)$

לכן מסיקים ש:

$$\mathcal{N}\left([T]_C^B\right) = \dim(\ker(T)), \text{Rank}\left([T]_C^B\right) = \dim(Im(T))$$

5. T הפיכה $\iff$ T_C^B הפיכה $\iff$ $[T]_C^B$ הפיכה, בנוסף $\left([T]_C^B\right)^{-1} = \left[T^{-1}\right]_B^C$.
6. $[S \circ T]_D^B = [S]_D^C \cdot [T]_C^B$.

אלגוריתם לחישוב המטריצה המייצגת: נבחר בסיס שנוח לחשב בו קואורדינטות ב־U - בדרך כלל הבסיס הסטנדרטי. $W = (w_1, \dots, w_n)$. נשתמש בדירוג:

$$\left(\begin{array}{ccc|ccc} | & & | & | & & | \\ [u_1]_W & \cdots & [u_m]_W & [T(b_1)]_W & \cdots & [T(b_n)]_W \\ | & & | & | & & | \end{array}\right)$$

$$\xrightarrow{R_1 \to \cdots} \cdots \to \left(\begin{array}{ccc|c} 1 & & & \\ & \ddots & & [T]_C^B \\ & & 1 & \end{array}\right)$$

באופן דומה לאיך שמחשבים מטריצה הופכית.

הגדרה 1.14 מטריצות שינוי הקואורדינטות: יהיו B, C שני בסיסים של מ"ו V. אז נגדיר את מטריצת שינוי הקואורדינטות מ־B ל־C על ידי: $[Id_V]_C^B$.

1. $\overline{v} \in V$, $[Id_V]_C^B \cdot [\overline{v}]_B = [\overline{v}]_C$.
2. $[T]_C^B = [Id]_C^{C'} \cdot [T]_{C'}^{B'} \cdot [Id_V]_{B'}^B$.

15 מטריצות דומות

יהיו $A, B \in M_n(\mathbb{F})$, נאמר כי A ו־B דומות אם קיימת מטריצה הפיכה P כך ש־$A = P^{-1} \cdot B \cdot P$.

משפט: נתון $A, B \in M_n(\mathbb{F})$ ריבועיות, הבאים שקולים:

1. A, B דומות.
2. קיימת $T : V \to V$ ובסיסים C, C' של V כך ש־$[T]_C = A, [T]_{C'} = B$.
3. לכל $T : V \to V$, אם קיים בסיס C של V כך ש־$[T]_C = A$, אז קיים בסיס C' של V כך ש־$[T]_{C'} = B$.

ואם A, B דומות אז:

1. $\text{Rank}(A) = \text{Rank}(B), \mathcal{N}(A) = \mathcal{N}(B)$.
2. $\text{tr}(A) = \text{tr}(B)$ כאשר $\text{tr}(A) = \sum_{i=1}^n (A)_{i,i}$.
3. $\det(A) = \det(B)$.

16 אלגוריתמים

16.1 צמצום סדרה לבת"ל

16.1.1 לפי שורות

יהיו $v_1, \dots, v_n \in \mathbb{F}^m$. נשים את $v_1, \dots, v_n$ כשורות, $B = \begin{pmatrix} v_1^t \\ \vdots \\ v_n^t \end{pmatrix} \in M_{n \times m}(\mathbb{F})$, ונדרג בלי להחליף שורות (כלומר, בעמודה של מקדם הפותח יש רק 1 במקום אחד והשאר אפסים, אבל המקדמים הפותחים לא ממוינים). השורות שהתאפסו מתאימות לוקטורים שהיו תלוים לינארית באחרים, וסדרת השורות שלא התאפסו הן סדרה בת"ל.

16.1.2 לפי עמודות

נשים את $v_1, \dots, v_n$ כעמודות, $A = (v_1 \dots v_n)$, נדרג ונבדוק שיש רק פתרון טריויאלי למערכת ההומוגנית $(A \mid 0)$, כלומר שאין אף משתנה חופשי.

16.2 השלמה של סדרה בת"ל לבסיס

תהא $(v_1, \dots, v_k)$ סדרה בת"ל, ו־$(u_1, \dots, u_m)$ סדרה פורשת. נבנה מטריצה ש<u>עמודותיה</u>:

$$(v_1, \dots, v_k, u_1, \dots, u_m)$$

נדרג את המטריצה, ונסתכל על העמודות מ־u שנפתחה בהן מדרגה. את ה־uים המתאימים נוסיף לסדרת ה־vים, ונקבל בסיס.

16.3 חיתוך של מרחבים וקטוריים

יהיו U, V מרחבים וקטוריים שבסיסיהם $v_1, \dots, v_n$ ו־$u_1, \dots, u_m$. נבנה מערכת משוואות:

$$\alpha_1 v_1 + \cdots + \alpha_n v_n = \beta_1 u_1 + \cdots + \beta_m u_m$$

ונראה מה הפתרונות. מרחב הפתרונות הוא בדיוק החיתוך.