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.

משתנה חופשי 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 צירופים לינאריים

הגדרה 1.3 סדרת m מיות $(\overline{v_1},\dots,\overline{v_k})\in(\mathbb{F}^m)^k$ תקרא <u>בלתי תלויה לינארית</u> (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 2.3 סדרת וקטורים $(v_1,\dots,v_m)\subseteq\mathbb{F}^n$ בלתי תלויה לינארית $\iff$ כל איבר אינו צירוף לינארי של קודמיו.

הגדרה 3.3 נגדיר את מרחב התלויות של $(\overline{v_1},\dots,\overline{v_k})$ להיות:

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

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

4 בסיס

הגדרה 1.4 (משפט 2 מתוך 3) יהי $\mathbb{F}$ שדה, B תת קבוצה של $\mathbb{F}^n$. אז B נקראת <u>בסיס</u> 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 מימד

הגדרה 2.4 (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 3.4 (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 4.4 (משפט המימדים השני): עבור $T:V\to U$,

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

4.2 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, באופן שקול סדרת השורות פורשת, 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, באופן שקול סדרת השורות בת"ל, 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 $A\overline{x}=\bar{b}$ יש פתרון יחיד.
3. לכל $\bar{b}\in\mathbb{F}^n$ למערכת $A\overline{x}=\bar{b}$ יש פתרון. הוא גם יחיד אבל מספיק להוכיח שיש פתרון.
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.
7. $|A|\neq 0$.
8. $\operatorname{rank}A=n$, כלומר $\mathcal{N}(A)=0$.

ובנוסף A,B הפיכות $\iff$ $A\cdot B$ הפיכה ו־A,B ריבועיות.

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: $A\cdot\operatorname{adj}(A)=$ מטריצת האפס $=\operatorname{adj}(A)\cdot A$.
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 $A\overline{x}=\bar{b}$ 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) אסוציייטיביות. $\forall\alpha,\beta\in\mathbb{F}.\forall\overline{v}\in V.\beta\cdot(\alpha\cdot\overline{v})=(\beta\cdot\alpha)\cdot v$.
   (ב) $\forall\overline{v}\in V.1_{\mathbb{F}}\cdot\overline{v}=\overline{v}$.
3. חוק הפילוג:
   (א) $\forall\alpha,\beta\in\mathbb{F}.\forall\overline{v}\in V.(\alpha+\beta)\cdot\overline{v}=\alpha\cdot\overline{v}+\beta\cdot\overline{v}$.
   (ב) $\forall a\in\mathbb{F}.\forall\overline{v_1},\overline{v_2}\in V.\alpha\cdot(\overline{v_1}+\overline{v_2})=\alpha\cdot\overline{v_1}+\alpha\cdot\overline{v_2}$.

8.1 בוחן תת מרחב

$U\subseteq F^n$ היא תת מרחב אמ"מ:

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

נובע מכאן גם שחיתוך של תתי מרחבים הוא תת מרחב.

9 בסיס האמל

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

10 סכום ישר

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

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

1. $U_1\oplus\dots\oplus U_n$.
2. לכל סדרות בת"ל B_i ב־U_i, השרשור $B_1\frown B_2\frown\dots\frown B_n$ 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 $n=2$, $U_1\cap U_2=\{\overline{0}\}$.

11 מרחב העמודות והשורות

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

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

משפט 1.11 $\dim(R(A))=\dim(C(A))$. יסומן גם כ־$\mathrm{Rank}(A)$.

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

משפט 2.11 (משפט הדרגה): פעולות דירוג משמרות את $R(A)$ (ולכן גם את $\mathrm{Rank}(A)$), אבל לא בהכרח משמרות את $C(A)$.

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

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

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

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

12 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.

12.1 תכונות בסיסיות

תהא $T:V\to U$ לינארית,

1. $T\left(\sum_{i=1}^{n}\alpha_iv_i\right)=\sum_{i=1}^{n}\alpha_iT(v_i)$ - 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 $\iff$ $\mathrm{Im}(T)=U$ (טריויאלי).
6. אם $(u_1,\dots,u_n)$ סדרה פורשת של V אז $(T(u_1),\dots,T(u_k))$ סדרה פורשת של $Im(T)$.

7. עבור $(v_1,\dots,v_n)$, $LD(v_1,\dots,v_n) \subseteq LD(T(v_1),\dots,T(v_n))$. לכן:
   (א) אם $(T(v_1),\dots,T(v_n))$ בת"ל אז $(v_1,\dots,v_n)$ בת"ל.
   (ב) אם $v_i \in \mathrm{sp}(v_1,\dots,v_{i-1},v_{i+1},\dots,v_n)$ אז גם $T(v_i) \in \mathrm{sp}(T(v_1),\dots,T(v_{i-1}),T(v_{i+1}),\dots,T(v_n))$.
   (ג) אם T חח"ע, אז $LD(T(v_1),\dots,T(v_n)) = LD(v_1,\dots,v_n)$.
   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 $1 \le i \le n$, $T(b_i)=u_i$. כלומר העתקה לינארית נקבעת ביחידות לפי $\dim(V)$ איברים.

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

12.2 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. $\mathrm{Im}\left(P_{(U,W)}\right) = U$, $P^{-1}_{(U,W)}[\{0\}] = W$.

12.3 איזומורפיזם

12.3.1 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 1.12 (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.

12.3.2 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 $[\cdot]_B : V \to \mathbb{F}^n$.

12.4 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.

12.5 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. $[T+S] = [T]+[S], [\alpha \cdot T] = \alpha \cdot [T], [S \circ T] = [S] \cdot [T]$.

13 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 $T_C^B : \mathbb{F}^{\dim(V)} \to \mathbb{F}^{\dim(U)}$:

$$T_C^B = Q_C \circ T \circ Q_B^{-1}$$
$$[T]_C^B = \left[T_C^B\right]$$

טענות:

1. $C_i\left(\left[T_C^B\right]\right) = T_C^B\left(e_i\right)$.
כלומר $[T]_C^B = \begin{pmatrix} | & & | \\ [T(b_1)]_C & \dots & [T(b_n)]_C \\ | & & | \end{pmatrix}$.
2. $[T]_C^B \cdot [v]_B = [T(v)]_C$.
3. לכל $\bar{v} \in V$, $\bar{v} \in \ker(T) \iff [\bar{v}]_B \in \text{Sols}\left([T]_C^B\right)$.
4. לכל $\bar{u} \in U$, $\bar{u} \in Im(T) \iff [\bar{u}]_C \in \text{Cols}\left([T]_C^B\right)$.
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:

$$\left(\begin{array}{ccc|ccc} | & & | & | & & | \\ [u_1]_W & \cdots & [u_m]_W & [T(b_1)]_W & \cdots & [T(b_n)]_W \\ | & & | & | & & | \end{array}\right)$$
$$\xrightarrow{R_1 \to \dots} \cdots \to \left(\begin{array}{ccc|c} 1 & & & \\ & \ddots & & [T]_C^B \\ & & 1 & \end{array}\right)$$

באופן דומה לאיך שמחשבים מטריצה הופכית.

הגדרה 1.13 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. $\bar{v} \in V$, $[Id_V]_C^B \cdot [\bar{v}]_B = [\bar{v}]_C$.
2. $[T]_C^B = [Id]_C^{C'} \cdot [T]_{C'}^{B'} \cdot [Id_V]_{B'}^B$.

14 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. $\det(A) = \det(B)$.

15 אלגוריתמים

15.1 צמצום סדרה לבת"ל

15.1.1 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.

15.1.2 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.

15.2 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 שעמודותיה:

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

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

15.3 חיתוך של מרחבים וקטוריים

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

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

ונראה מה הפתרונות. מרחב הפתרונות הוא בדיוק החיתוך.