

אלגברה ליניארית

פרק 8 - מרחבי מכפלה פנימית

תוכן העניינים

1.	מרחבי מכפלה פנימית	1
2.	הנורמה והמרחק	3
3.	אי שוויון קושי שוורץ, יישומים	5
4.	אורתוגונליות	7
5.	משלים אורתוגונלי	9
6.	קבוצה ובסיס אורתוגונלי	11
7.	ההיטל של וקטור	14
8.	תהליך גרהם שמידט	15
9.	מטריצות אורתוגונליות	16
10.	העתקות אורתוגונליות	19

מרחבי מכפלה פנימית

שאלות

(1) לכל שני וקטורים $u = (x_1, x_2)$, $v = (y_1, y_2)$ ב- $\mathbb{R}^2$, נגדיר:

$$\langle u, v \rangle = x_1 y_1 - 3x_1 y_2 - 3x_2 y_1 + 4x_2 y_2$$

בדוק האם ההגדרה לעיל מהווה מכפלה פנימית ב- $\mathbb{R}^2$.

(2) לכל שני וקטורים $u = (x_1, x_2)$, $v = (y_1, y_2)$ ב- $\mathbb{R}^2$, נגדיר:

$$\langle u, v \rangle = x_1 y_1 - 3x_1 y_2 - 3x_2 y_1 + kx_2 y_2$$

עבור אילו ערכים של הקבוע k ההגדרה לעיל מהווה מכפלה פנימית ב- $\mathbb{R}^2$?

(3) לכל שני וקטורים $u = (x_1, x_2, x_3)$, $v = (y_1, y_2, y_3)$ ב- $\mathbb{R}^3$, נגדיר:

$$\langle u, v \rangle = x_1 y_1 + kx_1 y_3 + x_2 y_2 + kx_3 y_1 + x_3 y_3$$

עבור אילו ערכים של הקבוע k ההגדרה לעיל מהווה מכפלה פנימית ב- $\mathbb{R}^3$?

(4) לכל שני וקטורים $u = (u_1, \dots, u_n)$, $v = (v_1, \dots, v_n)$ ב- $\mathbb{R}^n$,

נגדיר: $\langle u, v \rangle = \sum_{i=1}^n k_i u_i v_i$, כאשר $k_1, \dots, k_n$ מספרים חיוביים כלשהם.

הראה כי הנוסחה לעיל מגדירה מכפלה פנימית ב- $\mathbb{R}^n$.

מהי המכפלה המתקבלת אם $k_i = 1$ לכל $1 \leq i \leq n$?

(5) לכל שתי מטריצות A, B ב- $M_{mn}[R]$, נגדיר: $\langle A, B \rangle = \text{tr}(B^T A)$.

בדוק האם ההגדרה לעיל מהווה מכפלה פנימית ב- $M_{mn}[R]$.

tr מייצג את המילה trace (עקבה), כלומר, סכום איברי האלכסון.

(6) לכל שתי פונקציות f, g ב- $C[a, b]$, נגדיר: $\langle f, g \rangle = \int_a^b f \cdot g dx$.

בדוק האם ההגדרה לעיל מהווה מכפלה פנימית ב- $C[a, b]$.

- (7)** נתונה מכפלה פנימית על R^3 , שעבורה הקבוצה $B = \{(1,1,0), (1,1,0), (1,0,0)\}$ מהווה בסיס אורתונורמלי. חשב את המכפלה הפנימית של שני וקטורים כלליים $\langle (x_1, x_2, x_3), (y_1, y_2, y_3) \rangle$.

תשובות סופיות

- (1)** ההגדרה לא מהווה מכפלה פנימית.
- (2)** $k > 9$
- (3)** $-1 < k < 1$
- (4)** עבור $k_i = 1$ לכל $1 \leq i \leq n$, נקבל את המכפלה הפנימית הסטנדרטית.
- (5)** ההגדרה מהווה מכפלה פנימית ב- $M_{mn}[R]$.
- (6)** ההגדרה מהווה מכפלה פנימית ב- $C[a, b]$.
- (7)** $(x_1, x_2, x_3) \begin{pmatrix} 1 & -1 & 0 \\ -1 & 2 & -1 \\ 0 & -1 & 2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \end{pmatrix}$

הנורמה והמרחק

שאלות

1) נתונים שלושה וקטורים ב- $\mathbb{R}^3$: $u = (1, -2, 2)$, $v = (3, -2, 6)$, $w = (5, 3, -2)$

בהתייחס למכפלה הפנימית הרגילה ב- $\mathbb{R}^3$, חשב:

א. $\langle u, v \rangle$	ב. $\langle u, w \rangle$	ג. $\langle v, w \rangle$	ד. $\langle u + v, w \rangle$
ה. $\ u\ $	ו. $\ v\ $	ז. $\ u + v\ $	ח. $d(u, v)$
ט. $\hat{u}$	י. $\hat{v}$		

2) נתונות שלוש מטריצות ב- $M_{2 \times 3}[R]$:

$$A = \begin{pmatrix} 10 & 9 & 8 \\ 7 & 6 & 5 \end{pmatrix}, B = \begin{pmatrix} 2 & 3 & 4 \\ 5 & 6 & 7 \end{pmatrix}, C = \begin{pmatrix} 3 & -5 & 2 \\ 1 & 0 & -4 \end{pmatrix}$$

בהתייחס למכפלה הפנימית $\langle A, B \rangle = \text{tr}(B^T A)$ ב- $M_{2 \times 3}[R]$,

חשב:

א. $\langle A, B \rangle$	ב. $\langle A, C \rangle$	ג. $\langle A, B + C \rangle$
ד. $\langle B, C \rangle$	ה. $\langle 4A + 10B, 11C \rangle$	ו. $\ A\ $
ז. $\ B\ $	ח. $d(A, B)$	ט. $\hat{A}$

3) נתונים שלושה פולינומים ב- $C[0, 1]$:

$$p(x) = x + 3, q(x) = 3x + 1, r(x) = x^2 - 4x - 1$$

בהתייחס למכפלה הפנימית : $\langle p, q \rangle = \int_0^1 p(x) \cdot q(x) dx$

חשב:

א. $\langle p, q \rangle$	ב. $\langle p, r \rangle$	ג. $\langle p, q + r \rangle$
ד. $\ p\ $	ה. $d(p, q)$	ו. $\hat{r}$

$$(4) \text{ הוכח: } \|u+v\|^2 = \|u\|^2 + 2\langle u, v \rangle + \|v\|^2.$$

$$(5) \text{ הוכח: } \|u-v\|^2 = \|u\|^2 - 2\langle u, v \rangle + \|v\|^2.$$

$$(6) \text{ הוכח: } \langle u-v, u+v \rangle = \|u\|^2 - \|v\|^2.$$

$$(7) \text{ הוכח: } \|u+v\|^2 + \|u-v\|^2 = 2\|u\|^2 + 2\|v\|^2.$$

$$(8) \text{ הוכח: } \frac{1}{4}(\|u+v\|^2 - \|u-v\|^2) = \langle u, v \rangle.$$

תשובות סופיות

- (1) א. 19 ב. -5 ג. -3 ד. -8
ה. 3 ו. 7 ז. $\sqrt{96}$ ח. $\sqrt{20}$
ט. $\left(\frac{1}{3}, -\frac{2}{3}, \frac{2}{3}\right)$ י. $\left(\frac{3}{7}, -\frac{2}{7}, \frac{6}{7}\right)$
- (2) א. 185 ב. -12 ג. 173 ד. -24 ה. -3168
ו. $\sqrt{355}$ ז. $\sqrt{139}$ ח. $\sqrt{124}$ ט. $\frac{1}{\sqrt{355}} \begin{pmatrix} 3 & -5 & 2 \\ 1 & 0 & -4 \end{pmatrix}$
- (3) א. 9 ב. -9.5833 ג. -0.5833 ד. $\sqrt{\frac{37}{3}}$
- ה. $\sqrt{\frac{4}{3}}$ ו. $\frac{x^2 - 4x - 1}{\sqrt{7\frac{13}{15}}}$
- (4) שאלת הוכחה.
(5) שאלת הוכחה.
(6) שאלת הוכחה.
(7) שאלת הוכחה.
(8) שאלת הוכחה.

אי שוויון קושי-שוורץ, יישומים

שאלות

(1) הוכח כי אם u, v תלויים לינארית, אז $|\langle u, v \rangle| = \|u\| \cdot \|v\|$.

(2) יהיו $x_1, x_2, \dots, x_n$ ו- $y_1, y_2, \dots, y_n$ מספרים ממשיים. הוכח כי $(x_1 y_1 + x_2 y_2 + \dots + x_n y_n)^2 \leq (x_1^2 + x_2^2 + \dots + x_n^2)(y_1^2 + y_2^2 + \dots + y_n^2)$.

(3) יהיו f, g פונקציות רציפות בקטע הסגור $[a, b]$. הוכח כי $\left(\int_a^b f(x)g(x)dx \right)^2 \leq \left(\int_a^b f^2(x)dx \right) \left(\int_a^b g^2(x)dx \right)$.

(4) חשב את הזווית בין שני הווקטורים $u = (1, 2, 2)$, $v = (-2, 1, 2)$ ביחס למכפלה הפנימית הסטנדרטית ב- $\mathbb{R}^3$.

(5) חשב את הזווית בין שני הווקטורים $u = (3, 4)$, $v = (1, 2)$ ביחס למכפלה הפנימית $\langle (x_1, x_2), (y_1, y_2) \rangle = x_1 y_1 - x_1 y_2 - x_2 y_1 + 3x_2 y_2$ ב- $\mathbb{R}^2$.

(6) מצא את $\cos \theta$ עבור הזווית θ שבין $p(x) = 2x - 1$ ו- $q(x) = x^2$ בהתייחס למכפלה הפנימית : $\langle p, q \rangle = \int_0^1 p(x) \cdot q(x) dx$ שב- $C[0, 1]$.

(7) מצא את $\cos \theta$ עבור הזווית θ שבין $A = \begin{pmatrix} 2 & 1 \\ 3 & -1 \end{pmatrix}$, $B = \begin{pmatrix} 0 & -1 \\ 2 & 3 \end{pmatrix}$ בהתייחס למכפלה הפנימית : $\langle A, B \rangle = \text{tr}(B^T A)$ ב- $M_{2 \times 2}[\mathbb{R}]$.

תשובות סופיות

(1) הוכחה.

(2) הוכחה.

(3) הוכחה.

(4) $\theta = 63.61^\circ$ (5) $\theta = 9.44^\circ$ (6) $\cos \theta = 0.173^\circ$ (7) $\cos \theta = 0.00036^\circ$

אורתוגונליות

שאלות

1) הוכח כי הווקטורים $u = (1, 2, 3)$, $v = (4, 7, -6)$ אורתוגונליים ב- $\mathbb{R}^3$.

2) מצא את ערכו של הקבוע k , עבורו הווקטורים $u = (1, k, 3)$, $v = (4, 7, -6)$ יהיו אורתוגונליים ב- $\mathbb{R}^3$.

3) מצא וקטור יחידה המאונך לשני הווקטורים $u = (1, 2, 3)$, $v = (2, 5, 7)$ ב- $\mathbb{R}^3$.

4) הוכח כי הפולינומים $p(x) = 2x - 1$, $q(x) = 6x^2 - 6x + 1$ אורתוגונליים בקטע $[0, 1]$ (ביחס למכפלה הפנימית $\langle p, q \rangle = \int_0^1 p(x) \cdot q(x) dx$).

5) במרחב $P_n[\mathbb{R}]$ (מרחב הפולינומים ממעלה $n \geq 0$ מעל $\mathbb{R}$), נגדיר מכפלה פנימית:

$$\langle p(x), q(x) \rangle = \sum_{k=0}^n p(k)q(k) = p(0)q(0) + p(1)q(1) + \dots + p(n)q(n)$$

הראה כי הפולינומים:

$$p(x) = x(x-2)(x-4)(x-6), \quad q(x) = x(x-1)(x-3)(x-5)(x-7)$$

אורתוגונליים כאיברי המרחב $P_7[\mathbb{R}]$, עם המכפלה הפנימית שהוגדרה לעיל.

6) נתונות שתי מטריצות: $A = \begin{pmatrix} k & 1 \\ 3 & -1 \end{pmatrix}$, $B = \begin{pmatrix} 4 & -1 \\ 2 & 3 \end{pmatrix}$.

בהתייחס למכפלה הפנימית: $\langle A, B \rangle = \text{tr}(B^T A)$ ב- $M_{2 \times 2}[\mathbb{R}]$, מצא את הערך של הקבוע k , עבורו המטריצות הנ"ל אורתוגונליות.

7) הוכח כי: $\|u + v\| = \|u - v\| \Leftrightarrow u \perp v$.

מהו הפירוש הגיאומטרי של תכונה זו ב- $\mathbb{R}^2$?

8) הוכח כי: $\|u + v\|^2 = \|u\|^2 + \|v\|^2 \Leftrightarrow u \perp v$.

מהו הפירוש הגיאומטרי של תכונה זו?

9) הוכח כי : $\|u\| = \|v\| \Leftrightarrow (u-v) \perp (u+v)$.
מהו הפירוש הגיאומטרי של תכונה זו?

תשובות סופיות

1) הוכחה.

2) $k = 2$

3) $\left(\frac{-1}{\sqrt{3}}, \frac{-1}{\sqrt{3}}, \frac{1}{\sqrt{3}} \right)$

4) הוכחה.

5) הוכחה.

6) $k = 0.5$

7) הוכחה.

8) הוכחה.

9) הוכחה.

משלים אורתוגונלי

שאלות

(1) יהי $W = \text{span}\{(1, 2, -1, 1), (2, 5, 3, 1)\}$.

מצא בסיס וממד עבור $W^\perp$.
הראה כי מתקיים משפט הפירוק.

(2) יהי $w = \text{span}\{(1, 1, 1)\}$.

מצא בסיס וממד עבור $W^\perp$.
הראה כי מתקיים משפט הפירוק.

(3) יהי $W = \text{span}\{x\} \subseteq P_2[R]$.

מצא בסיס וממד עבור $W^\perp$, ביחס למכפלה הפנימית האינטגרלית בקטע $[0, 1]$.

(4) יהי $W = \text{span}\{x, x^2\} \subseteq P_2[R]$.

מצא בסיס וממד עבור $W^\perp$, ביחס למכפלה הפנימית האינטגרלית בקטע $[0, 1]$.

(5) יהי $W = \text{span}\left\{\begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 1 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}\right\} \subseteq M_{2 \times 2}[R]$.

מצא בסיס וממד עבור $W^\perp$, ביחס למכפלה הפנימית $\langle A, B \rangle = \text{tr}(B^T A)$
ב- $M_{2 \times 2}[R]$.

(6) מצא בסיס למשלים האורתוגונלי של מרחב המטריצות האלכסוניות מסדר 3.

(7) מצא בסיס למשלים האורתוגונלי של מרחב המטריצות הסימטריות מסדר 2.

(8) נתונה מערכת משוואות הומוגנית $A \cdot \underline{x} = 0$.

יהי U מרחב הפתרונות של המערכת.
תן פירוש אפשרי ל- U בעזרת המושג משלים אורתוגונלי,
והמושג מרחב השורות של המטריצה A .

(9) נניח ש- W_1, W_2 הן תת קבוצות של V .

הוכח כי: $W_1 \subseteq W_2 \Rightarrow W_2^\perp \subseteq W_1^\perp$.

(10) נניח ש- W הוא תת קבוצה של V .

הוכח כי: $W \subseteq W^{\perp\perp}$.

(11) נניח ש- W הוא תת קבוצה של V .

הוכח כי: $W = W^{\perp\perp}$ (אם V מממד סופי).

(12) נניח ש- W_1, W_2 הן תת קבוצות של V .

הוכח כי: $(W_1 + W_2)^\perp = W_1^\perp \cap W_2^\perp$.

(13) נניח ש- W_1, W_2 הן תת קבוצות של V .

הוכח כי: $(W_1 \cap W_2)^\perp = W_1^\perp + W_2^\perp$.

תשובות סופיות

$$W^\perp = \text{span}\{(-3, 1, 0, 1), (11, -5, 1, 0)\} \quad (1)$$

$$W^\perp = \text{span}\{(-1, 0, 1), (-1, 1, 0)\} \quad (2)$$

$$W^\perp = \text{span}\left\{\left(-\frac{2}{3} + x\right), \left(-\frac{1}{2} + x^2\right)\right\} \quad (3)$$

$$W^\perp = \text{span}\{(1.5x^2 - 6x + 5)\} \quad (4)$$

$$W^\perp = \text{span}\left\{\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}\right\} \quad (5)$$

$$B_W = \begin{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} & \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} & \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \\ \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} & \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{pmatrix} & \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \end{pmatrix} \quad (6)$$

$$B_{W^\perp} = \left\{\begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{pmatrix}\right\} \quad (7)$$

(8) הסבר בוידאו.

(9) הוכחה.

(10) הוכחה.

(11) הוכחה.

(12) הוכחה.

(13) הוכחה.

קבוצה ובסיס אורתוגונלי

שאלות

1 נתונה קבוצת וקטורים $S = \{(2,1,-4), (1,2,1), (3,-2,1)\}$ ב- $\mathbb{R}^3$.

- א. הראה שהקבוצה S אורתוגונלית.
 ב. נרמל את הקבוצה לקבלת קבוצה אורתונורמלית.
 ג. ללא חישוב, הוכח שהקבוצה מהווה בסיס ל- $\mathbb{R}^3$.

2 נתונה קבוצת וקטורים $S = \{(2,1,-4), (1,2,1), (3,-2,1)\}$ ב- $\mathbb{R}^3$.
 ללא דירוג, תוך שימוש במכפלות פנימיות, רשום את הווקטור $(13, -1, 7)$,
 כצירוף לינארי של איברי S .

3 נתונה קבוצת וקטורים $S = \{(2,1,-4), (1,2,1), (3,-2,1)\}$ ב- $\mathbb{R}^3$.
 רשום את וקטור הקואורדינטות של וקטור כלשהו $v = (a, b, c)$ ב- $\mathbb{R}^3$,
 ביחס לבסיס S .

4 נניח ש- $\{u_1, u_2, \dots, u_n\}$ היא בסיס אורתוגונלי ל- V .
 הוכח שלכל $v \in V$, אז $v = \frac{\langle v, u_1 \rangle}{\langle u_1, u_1 \rangle} u_1 + \frac{\langle v, u_2 \rangle}{\langle u_2, u_2 \rangle} u_2 + \dots + \frac{\langle v, u_n \rangle}{\langle u_n, u_n \rangle} u_n$.
 הערה: הקבוע $a_i = \frac{\langle v, u_i \rangle}{\langle u_i, u_i \rangle}$ נקרא מקדם פורייה של v ביחס ל- u_i ,
 או הרכיב של v ביחס ל- u_i .

5 נתונה קבוצת פונקציות $S = \{\cos x, \cos 2x, \cos 3x, \dots\}$ ב- $V = C[0, \pi]$.
 האם הקבוצה אורתוגונלית? אם כן, האם היא אורתונורמלית?
 במידה והקבוצה אורתוגונלית ולא אורתונורמלית,
 נרמל אותה לקבלת קבוצה אורתונורמלית.
 ענה ביחס למכפלה הפנימית האינטגרלית.

6 נתונה קבוצת פונקציות $S = \{1, \cos x, \sin x, \cos 2x, \sin 2x, \dots\}$ ב- $V = C[0, 2\pi]$.
 האם הקבוצה אורתוגונלית? אם כן, נרמל אותה לקבלת קבוצה אורתונורמלית.
 ענה ביחס למכפלה הפנימית האינטגרלית.
 האם הקבוצה מהווה בסיס?

7) נתונה קבוצה $S = \{(2, 4, 4), (4, -1, -1), (0, 2, -2)\}$ ב- $\mathbb{R}^3$.

בדוק האם הקבוצה S אורתוגונלית.
האם היא בסיס אורתוגונלי? האם היא אורתונורמלית?
האם היא בסיס אורתונורמלי?
במידה והקבוצה אורתוגונלית אך לא אורתונורמלית, נרמל אותה.

8) נתונה קבוצה $S = \{1, x, x^2, x^3\}$ ב- $P_3[R]$.

בדוק האם הקבוצה S אורתוגונלית.
האם היא בסיס אורתוגונלי? האם היא אורתונורמלית?
האם היא בסיס אורתונורמלי?
במידה והקבוצה אורתוגונלית אך לא אורתונורמלית, נרמל אותה.
(ענה ביחס למכפלה הפנימית האינטגרלית ב- $[0,1]$)

9) נתונה קבוצה $S = \{1, 2x-1, 6x^2-6x+1\}$ ב- $P_2[R]$.

בדוק האם הקבוצה S אורתוגונלית.
האם היא בסיס אורתוגונלי? האם היא אורתונורמלית?
האם היא בסיס אורתונורמלי?
במידה והקבוצה אורתוגונלית אך לא אורתונורמלית, נרמל אותה.
(ענה ביחס למכפלה הפנימית האינטגרלית ב- $[0,1]$)

10) נתונה הקבוצה $S = \left\{ \begin{pmatrix} 2 & 4 & 6 \\ 0 & 2 & 4 \\ 0 & 0 & 2 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 1 & 1 & -1 \\ 0 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \right\} \subseteq M_3[R]$

בדוק: האם הקבוצה S אורתוגונלית? האם היא בסיס אורתוגונלי?
האם היא אורתונורמלית? האם היא בסיס אורתונורמלי?
במידה והקבוצה אורתוגונלית אך לא אורתונורמלית, נרמל אותה.
ענה ביחס למכפלה הפנימית הסטנדרטית של המטריצות.

תשובות סופיות

1 א. הוכחה. ב. $S = \left\{ \frac{(2,1,-4)}{\sqrt{2^2+1^2+(-4)^2}}, \frac{(1,2,1)}{\sqrt{6}}, \frac{(3,-2,1)}{\sqrt{14}} \right\}$ ג. הוכחה.

2 $(13, -1, 7) = \frac{-1}{7}(2, 1, 4) + 3(1, 2, 1) + \frac{24}{7}(3, -2, 1)$

3 $\frac{2a+b-4c}{21}(2, 1, 4) + \frac{a+2b+c}{6}(1, 2, 1) + \frac{3a-2b+c}{14}(3, -2, 1)$

4 הוכחה.

5 הקבוצה אורתוגונלית, הקבוצה לא אורתונורמלית,

$$S = \left\{ \frac{\cos x}{\sqrt{0.5\pi}}, \frac{\cos 2x}{\sqrt{0.5\pi}}, \frac{\cos 3x}{\sqrt{0.5\pi}}, \dots \right\}$$

6 הקבוצה אורתוגונלית, הקבוצה לא אורתונורמלית,

$$S = \left\{ \frac{1}{\sqrt{2\pi}}, \frac{\cos x}{\sqrt{\pi}}, \frac{\sin x}{\sqrt{\pi}}, \frac{\cos 2x}{\sqrt{\pi}}, \frac{\sin 2x}{\sqrt{\pi}}, \dots \right\}$$

7 הקבוצה אורתוגונלית, הקבוצה מהווה בסיס אורתוגונלי, הקבוצה אינה

אורתונורמלית, $S = \left\{ \frac{1}{\sqrt{36}}(2, 4, 4), \frac{1}{\sqrt{8}}(4, -1, -1), \frac{1}{\sqrt{18}}(0, 2, -2) \right\}$

8 הקבוצה לא אורתוגונלית.

9 הקבוצה אורתוגונלית, הקבוצה מהווה בסיס אורתוגונלי,

$$S = \{1, \sqrt{3}(2x-1), \sqrt{5}(6x^2-6x+1)\}$$

10 הקבוצה אורתוגונלית, הקבוצה אינה בסיס אורתוגונלי, הקבוצה לא

אורתונורמלית, $S = \left\{ \frac{1}{\sqrt{80}} \begin{pmatrix} 2 & 4 & 6 \\ 0 & 2 & 4 \\ 0 & 0 & 2 \end{pmatrix}, \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \frac{1}{\sqrt{6}} \begin{pmatrix} 1 & 1 & -1 \\ 0 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \right\}$

ההיטל של וקטור

שאלות

- (1) מצא את מקדם פורייה c ואת ההיטל של $v = (1, 2, 2)$ לאורך $w = (0, 1, -1)$ ב- $\mathbb{R}^3$.
- (2) מצא את מקדם פורייה c ואת ההיטל של $v = (1, -2, 2, 0)$ לאורך $w = (0, 2, -1, 2)$ ב- $\mathbb{R}^4$. מסמנים גם $\text{proj}(v, w)$.
- (3) מצא את מקדם פורייה c ואת ההיטל של $p(x) = 2x - 1$ לאורך $q(x) = x^2$ במרחב הפולינומים עם המכפלה הפנימית האינטגרלית ב- $[0, 1]$.
- (4) מצא את מקדם פורייה c ואת ההיטל של $A = \begin{pmatrix} 1 & 2 \\ 3 & 4 \end{pmatrix}$ לאורך $B = \begin{pmatrix} 1 & 2 \\ -1 & 0 \end{pmatrix}$ במרחב המטריצות הממשיות מסדר 2 עם המכפלה הפנימית הסטנדרטית.

תשובות סופיות

- (1) $\text{proj}(v, w) = cw = 0, \quad c = 0$
- (2) $\text{proj}(v, w) = cw = -\frac{2}{3}(0, 2, -1, 2), \quad c = \frac{-2}{3}$
- (3) $\text{proj}(p, q) = c \cdot q(x) = \frac{5}{6}x^2, \quad c = \frac{5}{6}$
- (4) $\text{proj}(A, B) = cB = \frac{1}{3} \begin{pmatrix} 1 & 2 \\ -1 & 0 \end{pmatrix}, \quad c = \frac{1}{6}$

תהליך גרהם-שמידט

שאלות

1 נתון: $U = \text{span}\{(1, 2, 3), (4, 5, 6), (7, 8, 9)\} \subseteq \mathbb{R}^3$. מצא בסיס אורתונורמלי ל- U .

2 נתון: $U = \text{span}\{(2, 2, 2, 2), (1, 1, 2, 4), (1, 2, -4, -3)\} \subseteq \mathbb{R}^4$. מצא בסיס אורתונורמלי ל- U .

3 נתון: $U = \text{span}\{4, x, x^2, x^3\} \subseteq P_3[x]$. מצא בסיס אורתונורמלי ל- U , בהתייחס למכפלה הפנימית האינטגרלית בקטע $[-1, 1]$.

4 נתון: $U = \text{span}\left\{\begin{pmatrix} 1 & 2 \\ 3 & 4 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 1 & 2 \\ -1 & 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 & 2 \\ 1 & 1 \end{pmatrix}\right\} \subseteq M_2[R]$. מצא בסיס אורתונורמלי ל- U , בהתייחס למכפלה הפנימית הרגילה של המטריצות.

תשובות סופיות

$$B_{\text{orthonormal}} = \left\{ \frac{1}{\sqrt{15}}(1, 2, 3), \frac{1}{\sqrt{21}}(-4, -1, 2) \right\} \quad (1)$$

$$B_{\text{orthonormal}} = \left\{ w_1 = \frac{(2, 2, 2, 2)}{\sqrt{16}}, w_2 = \frac{(-1, -1, 0, 2)}{\sqrt{6}}, w_3 = \frac{(1, 3, -6, 2)}{\sqrt{50}} \right\} \quad (2)$$

$$B_{\text{orthonormal}} = \left\{ \hat{w}_1 = \frac{4}{\sqrt{32}}, \hat{w}_2 = \frac{x}{\sqrt{\frac{2}{3}}}, \hat{w}_3 = \frac{3x^2 - 1}{\sqrt{\frac{8}{5}}}, \hat{w}_4 = \frac{5x^3 - 3x}{\sqrt{\frac{8}{7}}} \right\} \quad (3)$$

$$B_{\text{orthonormal}} = \left\{ \hat{w}_1 = \frac{\begin{pmatrix} 1 & 2 \\ 3 & 4 \end{pmatrix}}{\sqrt{30}}, \hat{w}_2 = \frac{\begin{pmatrix} 7 & 14 \\ -9 & -2 \end{pmatrix}}{\sqrt{330}}, \hat{w}_3 = \frac{\begin{pmatrix} -4 & 3 \\ 2 & -2 \end{pmatrix}}{\sqrt{33}} \right\} \quad (4)$$

מטריצות אורתוגונליות

שאלות

- 1) ציין אילו מבין המטריצות הבאות הן אורתוגונליות.
במידה והמטריצה אורתוגונלית, מצא עבורה את המטריצה ההופכית:

א. $\begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ \sin \theta & -\cos \theta \end{pmatrix}$

ב. $\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix}$

ג. $\begin{pmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{pmatrix}$

- 2) הוכח את המשפטים הבאים:

- א. מטריצה ריבועית A היא אורתוגונלית אם ורק אם $A^T A = I$.
ב. מטריצה אורתוגונלית A היא הפיכה ומתקיים $A^{-1} = A^T$.

- 3) ענה על הסעיפים הבאים:

- א. תהי A מטריצה אורתוגונלית.
הוכח כי המטריצות A^{-1}, A^T אורתוגונליות.
ב. הוכח כי מכפלת מטריצות אורתוגונליות (מאותו סדר), היא מטריצה אורתוגונלית.
ג. הוכח שהדטרמיננטה של מטריצה אורתוגונלית היא 1 או -1.
ד. האם סכום מטריצות אורתוגונליות הוא בהכרח מטריצה אורתוגונלית?
ה. האם מכפלה של מטריצה אורתוגונלית בסקלר היא בהכרח מטריצה אורתוגונלית?
ו. הראה כי אם מטריצה אורתוגונלית היא משולשת, אז היא אלכסונית.

- 4) תהי A מטריצה מסדר n .

הוכח או הפרך:

- א. עמודותיה של המטריצה A מהוות בסיס אורתונורמלי ל- R^n ,
אם ורק אם שורותיה מהוות בסיס אורתונורמלי ל- R^n .
ב. עמודותיה של המטריצה A מהוות בסיס אורתוגונלי ל- R^n ,
אם ורק אם שורותיה מהוות בסיס אורתוגונלי ל- R^n .

(5) ענה על הסעיפים הבאים :

- א. תהי A מטריצה מסדר n , אשר עמודותיה, $\{v_1, \dots, v_n\}$, מהוות בסיס אורתוגונלי ל- R^n . נסמן $v_i v_i = \lambda_i$. הוכח כי $A^T A = \text{diag}\{\lambda_1, \dots, \lambda_n\}$.
- ב. הוכח: כדי להפוך מטריצה שעמודותיה מהוות בסיס אורתוגונלי, יש לחלק כל עמודה בסכום ריבועי איבריה ולשחלף לאחר מכן.

ג. הפוך את המטריצה $A = \begin{pmatrix} 1 & 0 & -2 \\ 0 & 4 & 0 \\ 2 & 0 & 1 \end{pmatrix}$.

ד. הפוך את המטריצה $A = \begin{pmatrix} 1 & 1 & \sqrt{2} \\ 2 & 2 & -\sqrt{8} \\ -\sqrt{0.5} & \sqrt{0.5} & 0 \end{pmatrix}$.

(6) הוכח את המשפט :

- יהיו B ו- C שני בסיסים אורתונורמליים של המרחב R^n . אז מטריצת המעבר מ- B ל- C היא מטריצה אורתוגונלית.

(7) ענה על הסעיפים הבאים :

- א. תהי A מטריצת המעבר מבסיס אורתונורמלי B לבסיס C , של המרחב R^n . הוכח כי אם A מטריצה אורתוגונלית, אז הבסיס C גם אורתונורמלי.
- ב. תהי A מטריצת המעבר מבסיס B לבסיס אורתונורמלי C , של המרחב R^n . הוכח כי אם A מטריצה אורתוגונלית, אז הבסיס B גם אורתונורמלי.

(8) ענה על הסעיפים הבאים :

- א. הוכח כי אם A מטריצה אורתוגונלית מסדר n , אז קיימים שני בסיסים אורתונורמליים B ו- C , של המרחב R^n , כך ש- A משמשת מטריצת המעבר מ- B ל- C .
- ב. יהי $v \in R^n$, כך ש- $\|v\|=1$. הוכח שקיימת מטריצה אורתוגונלית, שהעמודה הראשונה שלה היא הווקטור v .

תשובות סופיות

$$(1) \quad A^{-1} = \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ \sin \theta & -\cos \theta \end{pmatrix} \text{ א.} \quad B^{-1} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & \sin \alpha \\ 0 & -\sin \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix} \text{ ב.}$$

ג. לא אורתוגונלית.

(2) שאלת הוכחה.

(3) שאלת הוכחה.

(4) שאלת הוכחה.

(5) א. שאלת הוכחה. ב. שאלת הוכחה.

$$A^{-1} = \begin{pmatrix} 0.2 & 0 & 0.4 \\ 0 & 0.25 & 0 \\ -0.4 & 0 & 0.2 \end{pmatrix} \text{ ג.} \quad A^{-1} = \begin{pmatrix} 0.25 & 0.125 & -\sqrt{0.5} \\ 0.25 & 0.125 & \sqrt{0.5} \\ \sqrt{0.125} & -\sqrt{0.125} & 0 \end{pmatrix} \text{ ד.}$$

(6) שאלת הוכחה.

(7) שאלת הוכחה.

(8) שאלת הוכחה.

העתקות אורתוגונליות

שאלות

- (1) תהי $T: R^n \rightarrow R^n$ העתקה לינארית.
הוכח את המשפט: T אורתוגונלית $\Leftrightarrow \forall u \in R^n, \|T(u)\| = \|u\|$.
- (2) תהי $T: R^n \rightarrow R^n$ העתקה לינארית אורתוגונלית.
א. הוכח כי T איזומורפיזם.
ב. הוכח כי גם T^{-1} אורתוגונלית.
- (3) ענה על הסעיפים הבאים:
א. תהי A מטריצה אורתוגונלית מסדר n .
נגדיר העתקה לינארית $T: R^n \rightarrow R^n$, על ידי $T(u) = Au$.
הוכח כי T היא העתקה אורתוגונלית.
ב. הוכח שכל העתקה אורתוגונלית $T: R^n \rightarrow R^n$, ניתן להציג בצורה $T(u) = Au$, כאשר A אורתוגונלית.
- (4) ענה על הסעיפים הבאים:
א. הוכח שהערכים העצמיים היחידים של העתקה אורתוגונלית הם ± 1 .
ב. הוכח שהערכים העצמיים היחידים של מטריצה אורתוגונלית הם ± 1 .
- (5) הוכח שמכפלת העתקות אורתוגונליות היא העתקה אורתוגונלית.
- (6) ענה על הסעיפים הבאים:
א. תהי $T: R^n \rightarrow R^n$ העתקה אורתוגונלית,
ויהי $\{u_1, \dots, u_n\}$ בסיס אורתונורמלי כלשהו של R^n .
הוכח ש- $\{T(u_1), \dots, T(u_n)\}$ אף הוא בסיס אורתונורמלי של R^n .
ב. תהי $T: R^n \rightarrow R^n$ העתקה לינארית,
ונניח שיש בסיס אורתונורמלי $\{u_1, \dots, u_n\}$ של R^n ,
כך שגם הקבוצה $\{T(u_1), \dots, T(u_n)\}$ מהווה בסיס אורתונורמלי של R^n .
הוכח כי T היא העתקה אורתוגונלית.

7) ענה על הסעיפים הבאים :

- א. הוכח שמטריצה, שמייצגת העתקה אורתוגונלית לפי בסיס אורתונורמלי, היא בהכרח מטריצה אורתוגונלית.
- ב. הוכח שכל העתקה לינארית, שהמטריצה המייצגת שלה בבסיס אורתונורמלי כלשהו היא אורתוגונלית, היא בהכרח העתקה אורתוגונלית.

8) בכל אחד מהסעיפים הבאים רשמו את הנוסחה עבור ההעתקה T :

- א. $T: \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}^2$ העתקת השיקוף ביחס לישר $y = \frac{1}{\sqrt{3}}x$.
- ב. $T: \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}^2$ העתקת השיקוף ביחס לישר $y = \sqrt{3}x$.
- ג. $T: \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}^2$ העתקת הסיבוב בזווית 30° ב- $\mathbb{R}^2$.

9) בכל אחד מהסעיפים הבאים תאר את פעולת ההעתקה מבחינה גיאומטרית. השתמש במושגים שיקוף וסיבוב.

$$\begin{array}{ll} \text{א. } T \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{\sqrt{2}} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} & \text{ב. } T \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{3}{5} & \frac{4}{5} \\ \frac{4}{5} & -\frac{3}{5} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} \\ \text{ג. } T \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} & \text{ד. } T \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{4}{5} & -\frac{3}{5} \\ -\frac{3}{5} & -\frac{4}{5} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} \end{array}$$

* את סעיף ד' פתור בשתי דרכים שונות.

10) תהי $T: \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}^2$ העתקה לינארית, שמסובבת וקטור ב- θ מעלות נגד כיוון השעון. מצא נוסחה עבור ההעתקה T .

11) תהי $T: \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}^2$ העתקת השיקוף ביחס לישר $y = \tan \frac{\theta}{2} x$. מצא נוסחה עבור ההעתקה T .

12) תהי $T: \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}^2$ העתקה אורתוגונלית. הוכח ש- T היא בהכרח העתקת סיבוב, או העתקת שיקוף.

תשובות

(1) שאלת הוכחה.

(2) שאלת הוכחה.

(3) שאלת הוכחה.

(4) שאלת הוכחה.

(5) שאלת הוכחה.

(6) שאלת הוכחה.

(7) שאלת הוכחה.

$$(8) \quad \text{א. } T(x, y) = \left(\frac{1}{2}x + \frac{\sqrt{3}}{2}y, \frac{\sqrt{3}}{2}x - \frac{1}{2}y \right) \quad \text{ב. } T(x, y) = \left(-\frac{1}{2}x + \frac{\sqrt{3}}{2}y, \frac{\sqrt{3}}{2}x + \frac{1}{2}y \right)$$

$$\text{ג. } T(x, y) = \left(\frac{\sqrt{3}}{2}x - \frac{1}{2}y, \frac{1}{2}x + \frac{\sqrt{3}}{2}y \right)$$

$$(9) \quad \text{א. שיקוף ביחס לישר } y = 0.4142x \quad \text{ב. שיקוף ביחס לישר } y = \frac{1}{2}x$$

ג. סיבוב של 90 מעלות במישור.

$$\text{ד. דרך I: סיבוב של 90 מעלות ולאחריו שיקוף ביחס לישר } y = \frac{1}{2}x$$

$$\text{דרך II: שיקוף ביחס לישר } y = -\frac{1}{3}x$$

$$(10) \quad T \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}$$

$$(11) \quad T \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ \sin \theta & -\cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}$$

(12) שאלת הוכחה.