

אנליזה מתמטית

פרק 18 - מטריצות אורתוגונליות, העתקות אורתוגונליות, לכסון אורתוגונלי

תוכן העניינים

1. מטריצות אורתוגונליות.....1
2. העתקות אורתוגונליות.....6
3. דמיון ולכסון אורתוגונלי.....9

מטריצות אורתוגונליות

שאלות

- (1) ציינו 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) הוכיחו 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) ענו על הסעיפים הבאים:

- א. תהי A מטריצה אורתוגונלית.
הוכיחו כי המטריצות A^{-1}, A^T אורתוגונליות.
ב. הוכיחו כי מכפלת מטריצות אורתוגונליות (מאותו סדר), היא מטריצה אורתוגונלית.
ג. הוכיחו 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. הראו כי אם מטריצה אורתוגונלית היא משולשת, אז היא אלכסונית.

- (4) תהי A מטריצה מסדר n .
הוכיחו או הפריכו:

- 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) ענו על הסעיפים הבאים :

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

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

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

(6) הוכיחו את המשפט :

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

(7) ענו על הסעיפים הבאים :

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

(8) ענו על הסעיפים הבאים :

- א. הוכיחו 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- $\|v\| = 1$. הוכיחו שקיימת מטריצה אורתוגונלית, שהעמודה הראשונה שלה היא הווקטור v .

9) תהי $A \in M_n(\mathbb{R})$ אורתוגונלית וסימטרית.

נגדיר $B = I + A$.

א. הוכיחו כי $B^2 = 2B$.

ב. ידוע ש- $|B| = 1024$.

מצאו את n .

10) ענו על הסעיפים הבאים:

א. מצאו את מטריצת הסיבוב בזווית 30° ב- R^2 .

ב. מצאו את מטריצת השיקוף ביחס לישר $y = \frac{1}{\sqrt{3}}x$ ב- R^2 .

ג. מצאו את מטריצת השיקוף ביחס לישר $y = \sqrt{3}x$ ב- R^2 .

11) בכל אחד מהסעיפים הבאים תארו את פעולת המטריצה מבחינה גיאומטרית. השתמשו במושגים שיקוף וסיבוב.

א. $\begin{pmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{\sqrt{2}} \end{pmatrix}$

ב. $\begin{pmatrix} \frac{3}{5} & \frac{4}{5} \\ \frac{4}{5} & -\frac{3}{5} \end{pmatrix}$

ג. $\begin{pmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}$

12) הוכיחו שהמטריצה $R = \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix}$ מסובבת וקטור במישור ב- θ מעלות

נגד כיוון השעון, כאשר $0 \leq \theta \leq \pi$.

כלומר, הוכיחו שהזווית בין כל וקטור $v \in \mathbb{R}^2$ לבין Rv היא θ .

13) נסמן: $\text{Rot}_\theta = \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix}$, $\text{Ref}_{\theta/2} = \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ \sin \theta & -\cos \theta \end{pmatrix}$

הוכיחו כי:

א. $\text{Rot}_\theta \cdot \text{Rot}_\phi = \text{Rot}_{\theta+\phi}$

ב. $\text{Ref}_{\theta/2} \cdot \text{Ref}_{\phi/2} = \text{Rot}_{\theta-\phi}$

(14) תהי $A_{2 \times 2}(\mathbb{R})$ מטריצה אורתוגונלית.
 הוכיחו ש- A היא בהכרח מטריצת סיבוב או מטריצת שיקוף.

(15) יהי $v_{n \times 1} \in \mathbb{R}^n$ וקטור יחידה.
 נגדיר מטריצה $H_{n \times n}$ על ידי: $H = I - 2v \cdot v^T$ (נקראת גם מטריצת האוסהולדר).
 הוכיחו:

א. H מטריצה סימטרית.

ב. H מטריצה אורתוגונלית ו- $H^2 = I$.

ג. המטריצה H עבור $v = \begin{pmatrix} 1/\sqrt{2} \\ 1/\sqrt{2} \end{pmatrix}$ היא מטריצת שיקוף ביחס לישר $y = -x$.

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.

(9) א. שאלת הוכחה. ב. $n=10$

$$(10) \quad \text{א.} \begin{pmatrix} \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{1}{2} \\ \frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \end{pmatrix} \quad \text{ב.} \begin{pmatrix} \frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{1}{2} \end{pmatrix} \quad \text{ג.} \begin{pmatrix} -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{2} \end{pmatrix}$$

(11) א. המטריצה מתארת שיקוף ביחס לישר $y = 0.4142x$.ב. המטריצה מתארת שיקוף ביחס לישר $y = \frac{1}{2}x$.ג. המטריצה מתארת סיבוב של 90° במישור.

(12) שאלת הוכחה.

(13) שאלת הוכחה.

(14) שאלת הוכחה.

(15) שאלת הוכחה.

העתקות אורתוגונליות

שאלות

- (1) תהי $T: R^n \rightarrow R^n$ העתקה לינארית.
 הוכיחו 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. הוכיחו כי T איזומורפיזם.
 ב. הוכיחו כי גם T^{-1} אורתוגונלית.
- (3) ענו על הסעיפים הבאים:
 א. תהי A מטריצה אורתוגונלית מסדר n .
 נגדיר העתקה לינארית $T: R^n \rightarrow R^n$, על ידי $T(u) = Au$.
 הוכיחו כי T היא העתקה אורתוגונלית.
 ב. הוכיחו שכל העתקה אורתוגונלית $T: R^n \rightarrow R^n$, ניתן להציג בצורה $T(u) = Au$, כאשר A אורתוגונלית.
- (4) ענו על הסעיפים הבאים:
 א. הוכיחו שהערכים העצמיים היחידים של העתקה אורתוגונלית הם ± 1 .
 ב. הוכיחו שהערכים העצמיים היחידים של מטריצה אורתוגונלית הם ± 1 .
- (5) הוכיחו שמכפלת העתקות אורתוגונליות היא העתקה אורתוגונלית.
- (6) ענו 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 .
 הוכיחו 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 .
 הוכיחו כי T היא העתקה אורתוגונלית.

7) ענו על הסעיפים הבאים :

- א. הוכיחו שמטריצה, שמייצגת העתקה אורתוגונלית לפי בסיס אורתונורמלי, היא בהכרח מטריצה אורתוגונלית.
- ב. הוכיחו 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 תארו את פעולת ההעתקה מבחינה גיאומטרית. השתמשו 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' פתרו בשתי דרכים שונות.

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

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

12) תהי $T: \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}^2$ העתקה אורתוגונלית. הוכיחו 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.

דמיון ולכסון אורתוגונלי

שאלות

- (1) A, B, C מטריצות ריבועיות. הוכיחו את התכונות הבאות של יחס הדמיון האורתוגונלי:
- א. A דומה אורתוגונלית לעצמה (רפלקסיביות).
 - ב. אם A דומה אורתוגונלית ל- B אז B דומה אורתוגונלית ל- A (סימטריות).
 - ג. אם A דומה אורתוגונלית ל- B ו- B דומה אורתוגונלית ל- C אז A דומה אורתוגונלית ל- C (טרנזיטיביות).

- (2) ענו על הסעיפים הבאים:
- א. הוכיחו שמטריצה סימטרית יכולה להיות דומה אורתוגונלית רק למטריצה סימטרית.
 - ב. הביאו דוגמה לשתי מטריצות דומות שאינן דומות אורתוגונלית.

- (3) $A = \begin{pmatrix} 0 & -1 & -1 & -1 \\ -1 & 0 & -1 & -1 \\ -1 & -1 & 0 & -1 \\ -1 & -1 & -1 & 0 \end{pmatrix}$ לכסנו אורתוגונלית את המטריצה. כלומר, מצאו מטריצה אורתוגונלית P , כך ש- $P^T A P = D_{\text{diagonal}}$.

- (4) $A = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}$ לכסנו אורתוגונלית את המטריצה. כלומר, מצאו מטריצה אורתוגונלית P , כך ש- $P^T A P = D_{\text{diagonal}}$.

- (5) $A = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 2 \\ 1 & 2 & 1 \\ 2 & 1 & 1 \end{pmatrix}$ לכסנו אורתוגונלית את המטריצה. כלומר, מצאו מטריצה אורתוגונלית P , כך ש- $P^T A P = D_{\text{diagonal}}$.

תשובות סופיות

(1) שאלת הוכחה.

(2) א. שאלת הוכחה. ב. $A = \begin{pmatrix} 1 & 2 \\ 2 & 4 \end{pmatrix}$, $B = \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 4 & 4 \end{pmatrix}$.

$$P = \begin{pmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{-1}{\sqrt{6}} & \frac{-2}{\sqrt{48}} & \frac{1}{2} \\ 0 & \frac{2}{\sqrt{6}} & \frac{-2}{\sqrt{48}} & \frac{1}{2} \\ 0 & 0 & \frac{6}{\sqrt{48}} & \frac{1}{2} \\ \frac{-1}{\sqrt{2}} & \frac{-1}{\sqrt{6}} & \frac{-2}{\sqrt{48}} & \frac{1}{2} \end{pmatrix}, \quad D = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -3 \end{pmatrix} \quad (3)$$

$$P = \begin{pmatrix} \frac{-1}{\sqrt{2}} & \frac{-1}{\sqrt{6}} & \frac{1}{\sqrt{3}} \\ 0 & \frac{2}{\sqrt{6}} & \frac{1}{\sqrt{3}} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{-1}{\sqrt{6}} & \frac{1}{\sqrt{3}} \end{pmatrix}, \quad D = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 3 \end{pmatrix} \quad (4)$$

$$P = \begin{pmatrix} \frac{-1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{1}{\sqrt{6}} \\ 0 & \frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{-2}{\sqrt{6}} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{1}{\sqrt{6}} \end{pmatrix}, \quad D = \begin{pmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & 4 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (5)$$