دانشگاه صنعتی شریف
دانشکده‌ی مهندسی کامپیوتر

درس یادگیری ماشین

استاد سید عباس حسینی

تمرین دوم | مروری بر مباحث جبرخطی و آمار | مصطفی قدیمی

سؤال ۱. مقدار ویژه

- جمع مقادیر ویژه برابر با trace است.

اگر معادله مشخصه ماتریس را بنویسیم ($p(\lambda) = det(A - \lambda I)$)، داریم:

$$p(\lambda) = \det(A - \lambda I) = (-1)^n \big(\lambda^n - (\mathbf{tr}A)\,\lambda^{n-1} + \cdots + (-1)^n \det A\big)\,.$$

از طرفی می‌دانیم:

$$p(\lambda) = (-1)^n (\lambda - \lambda_1) \ldots (\lambda - \lambda_n)$$

λ_j نشان‌دهنده‌ی مقدار ویژه‌ی ماتریس A است؛ بنابراین با مقایسه‌ی ضرایب، این رابطه اثبات می‌شود.

$$tr(A) = \lambda_1 + \cdots + \lambda_n$$

- ضرب مقادیر ویژه برابر با دترمینان ماتریس است.

بار دیگر اگر معادله‌ی مشخصه را بنویسیم و فرض کنیم که λ ریشه‌های این معادله هستند، داریم:

$$\begin{aligned}
\det(A - \lambda I) = p(\lambda) &= (-1)^n (\lambda - \lambda_1)(\lambda - \lambda_2) \cdots (\lambda - \lambda_n) \\
&= (-1)(\lambda - \lambda_1)(-1)(\lambda - \lambda_2) \cdots (-1)(\lambda - \lambda_n) \\
&= (\lambda_1 - \lambda)(\lambda_2 - \lambda) \cdots (\lambda_n - \lambda)
\end{aligned}$$

در معادله‌ی اول، ضریب $(-1)^n$ از فاکتورگیری به دست آمده است. این ضریب را می‌توان به‌جای فاکتورگیری روی قطر گسترش داد و به معادله‌ی دوم رسید.

حال اگر λ را برابر با صفر قرار دهیم (چون متغیر است)، در سمت چپ معادله‌ی مشخصه $det(A)$ و در سمت راست $\lambda_1 \ldots \lambda_n$ به دست می‌آید، به بیان دیگر:

$$det(A) = \lambda_1 \ldots \lambda_n$$

- مقدار ویژه‌های AB و BA با یک‌دیگر برابرند.

اگر λ مقادیر ویژه‌ی AB باشند و آن را در بردار ناصفر x ضرب کنیم، داریم:

$$ABx = \lambda x$$

حال اگر $y = Bx$ باشد، آن‌گاه y هم ناصفر خواهد بود (در غیر این صورت در معادله‌ی بالا یا x و یا λ برابر با صفر می‌شوند که خلاف فرضیات ما است.). با جای‌گذاری روابط داریم:

$$BAy = BABx = B(ABx) = B(\lambda x) = \lambda Bx = \lambda y$$

همان‌طور که مشاهده می‌شود، ثابت شد که λ مقدار ویژه‌ی BA نیز هست.

سؤال ۲. مشتق‌گیری

هر کدام از روابط زیر را ثابت کنید.

- $\frac{\partial a^t x}{\partial x} = a$

$$\frac{\partial a^t x}{\partial x} = \frac{\partial \begin{pmatrix} a_1 & \dots & a_n \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix}}{\partial x} = \frac{\partial(a_1 x_1 + \cdots + a_n x_n)}{\partial x}$$

اگر $f = (a_1 x_1 + \cdots + a_n x_n)$ داریم:

$$\frac{\partial a^t x}{\partial x} = \frac{\partial f}{\partial x} = \begin{pmatrix} \frac{\partial f}{\partial x_1} \\ \dots \\ \frac{\partial f}{\partial x_n} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_1 \\ \dots \\ a_n \end{pmatrix} = a$$

- $\frac{\partial x^t ddAx}{\partial x} = 2xA$

سؤال ۳. مقدار ویژه و رنک

- ثابت کنید اگر P یک ماتریس با رنک کامل باشد، ماتریس‌های M و $P^{-1}MP$ مجموعه مقدار ویژه‌ی یکسان دارند.

فرض کنید λ محموعه مقدار ویژه‌ی $P^{-1}MP$ است. باید نشان دهیم که λ مقدار ویژه‌ی M نیز می‌باشد. حال اگر x بردار ویژه باشد داریم:

$$P^{-1}MPx = \lambda x \to M(Px) = \lambda Px$$

بنابراین Px یک بردار ویژه با مقدار ویژه‌ی λ است. به طور مشابه طرف دیگر آن اثبات می‌شود. اگر بردار ویژه‌ی x متعلق به M باشد، می‌توان نشان داد که $P^{-1}x$ یک بردار ویژه از $P^{-1}MP$ است:

$$P^{-1}MP(P^{-1}x) = P^{-1}Mx = \lambda P^{-1}x$$

ثابت شد که مقدار ویژه‌ی یکسان دارند.

نکته: از خاصیت رنک کامل بودن برای معکوس‌پذیر بودن P استفاده شده است.

- ثابت کنید که مجموع ابعاد فضای ویژه ماتریس $M_{n\times n}$ نمی‌تواند بیش‌تر از n شود. (M در بیش‌ترین حالت n تا مقدار ویژه‌ی متفاوت دارد.)

سؤال ۴. معین متقارن

ثابت کنید هر ماتریس مثبت معین متقارن A یک شکل یکتا به فرم $A = LL^T$ دارد که L پایین مثلثی با درایه‌های قطری مثبت است. (چولسکی)
برای اثبات آن از استقرا روی ابعاد آن استفاده می‌کنیم:

- اگر $n = 1$: ماتریس $A_{1\times1}$ مثبت معین است؛ اگر و تنها اگر به فرم $A = (a)$ با $a > 0$ باشد. اگر $l = \sqrt{a}$ و $L = (l)$ باشد، جلوتر ثابت می‌کنیم که L فاکتور چولسکی A می‌باشد.

- اگر $n \to n+1$: فرض کنید برای همه‌ی ماتریس‌های متقارن و مثبت معین نشان داده‌ایم که فاکتور چولسکی دارند؛ بنابراین ماتریس A را می‌توان به فرم زیر نوشت:

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{pmatrix}$$

که $a_{11} \in \mathbb{R}$، $A_{12} \in \mathbb{R}^{1\times n}$، $A_{21} = A_{12}^T$ و $A_{22} \in \mathbb{R}^{n\times n}$ است. حال تعریف S را به صورت زیر تعریف می‌کنیم:

$$S = A_{22} - \frac{1}{a_{11}} A_{21} A_{12}$$

S، مکمل Schur ماتریس A با توجه به a_{11} است. بدیهی است که ماتریس S متقارن است. بنابراین تنها کافی است نشان دهیم که مثبت معین است. فرض کنید $x \neq 0$ و $y \in \mathbb{R}^{n\times n}$ بوده و به صورت زیر باشد:

$$y = \begin{pmatrix} -\frac{1}{a_{11}} A_{12} x \\ x \end{pmatrix}$$

آن‌گاه $y \neq 0$ است و بنابراین با مثبت معین بودن A ثابت می‌کند که $y^T A y > 0$. علاوه‌بر آن داریم:

$$\begin{aligned}
y^T A y &= \begin{pmatrix} -\frac{1}{a_{11}} A_{12} x & x^T \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} -\frac{1}{a_{11}} A_{12} x \\ x \end{pmatrix} \\
&= \begin{pmatrix} -\frac{1}{a_{11}} A_{12} x & x^T \end{pmatrix} \begin{pmatrix} -A_{12}x + A_{12}x \\ -\frac{1}{a_{11}} A_{21} A_{12} x + A_{22} x \end{pmatrix} \\
&= \begin{pmatrix} -\frac{1}{a_{11}} A_{12} x & x^T \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ -\frac{1}{a_{11}} A_{21} A_{12} x + A_{22} x \end{pmatrix} \\
&= -\frac{1}{a_{11}} x^T A_{21} A_{12} x + x^T A_{22} x \\
&= x^T S x
\end{aligned}$$

بنابراین $x^T S x > 0$ هرگاه $x \neq 0$ ثابت می‌شود که S مثبت معین است. با توجه به متقارن و مثبت معین بودن ماتریس S و با استفاده از فرض استفرا می‌توان نتیجه گرفت که تجزیه چولسکی دارد؛ یعنی می‌توان آن را به صورت $S = L_S L_S^T$ نوشت و L ماتریس پایین مثلثی است. L را به شکل زیر تعریف می‌کنیم:

$$L = \begin{pmatrix} \sqrt{a_{11}} & 0 \\ \frac{1}{\sqrt{a_{11}}} A_{21} & L_S \end{pmatrix}$$

مثبت معین بودن A به ما می‌فهماند که $a_{11} > 0$؛ بنابراین با استفاده از $A_{21}^T = A_{12}$ به راحتی می‌توان دید که L پایین مثلثی است.

$$
\begin{aligned}
LL^T &= \begin{pmatrix} \sqrt{a_{11}} & 0 \\ \frac{1}{\sqrt{a_{11}}} A_{21} & L_S \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \sqrt{a_{11}} & \frac{1}{\sqrt{a_{11}}} A_{12} \\ 0 & L_S^T \end{pmatrix} \\
&= \begin{pmatrix} a_{11} & A_{12} \\ A_{21} & \frac{1}{a_{11}} A_{21} A_{12} + L_S L_S^T \end{pmatrix} \\
&= \begin{pmatrix} a_{11} & A_{12} \\ A_{21} & \frac{1}{a_{11}} A_{21} A_{12} + S \end{pmatrix} \\
&= A
\end{aligned}
$$

سؤال ۵. مفاهیم پایه‌ای