Машинное обучение, ВМК МГУ, осень 2025

Домашнее задание. Матричные вычисления и матричное дифференцирование.

Мягкий дедлайн: 23 октября, 5:00
Жёсткий дедлайн: 30 октября, 5:00
Формат сдачи: pdf-файл, подготовленный с помощью $\TeX$ или скан рукописных записей (скан должен быть собран в один pdf-файл с порядком страниц, соответствующим задачам в задании).

Обозначения:

- $\langle x, y\rangle$ – Евклидово скалярное произведение;
- $\|x\| = \langle x, x\rangle^{1/2} = (x^T x)^{1/2}$ – Евклидова норма вектора;
- $\|A\|_F = \langle A, A\rangle^{1/2} = \mathrm{tr}(A^T A)^{1/2}$ – матричная норма Фробениуса;
- I_n – единичная матрица размера $n\times n$;
- $\mathbb{R}^n_+ = \{x \in \mathbb{R}^n \mid x_i \geq 0 \ \forall i\}$, $\mathbb{R}^n_{++} = \{x \in \mathbb{R}^n \mid x_i > 0 \ \forall i\}$;
- $\mathbb{S}^n = \{A \in \mathbb{R}^{n\times n} \mid A = A^T\}$;
- $\mathbb{S}^n_+ = \{A \in \mathbb{S}^n \mid A \text{ – неотр. определённая}\}$, $\mathbb{S}^n_{++} = \{A \in \mathbb{S}^n \mid A \text{ – полож. определённая}\}$.

Все задачи (каждый подпункт) оцениваются одинаково из общей суммы в 10 баллов.

1. Докажите тождество Вудбери:
$$(A + UCV)^{-1} = A^{-1} - A^{-1}U(C^{-1} + VA^{-1}U)^{-1}VA^{-1},$$
где $A \in \mathbb{R}^{n\times n}$, $C \in \mathbb{R}^{m\times m}$, $U \in \mathbb{R}^{n\times m}$ и $V \in \mathbb{R}^{m\times n}$, $\det(A) \neq 0$, $\det(C) \neq 0$.

2. Упростите каждое из следующих выражений:
   (a) $\|uv^T - A\|_F^2 - \|A\|_F^2$, где $u \in \mathbb{R}^m$, $v \in \mathbb{R}^n$, $A \in \mathbb{R}^{m\times n}$.
   (b) $\mathrm{tr}((2I_n + aa^T)^{-1}(uv^T + vu^T))$, где $a, u, v \in \mathbb{R}^n$. *Подсказка: воспользуйтесь тождеством Вудбери.*
   (c) $\sum_{i=1}^n \langle S^{-1}a_i, a_i\rangle$, где $a_1, \ldots, a_n \in \mathbb{R}^d$, $S = \sum_{i=1}^n a_i a_i^T$, $\det(S) \neq 0$.

3. Для каждой из следующих функций найдите первую и вторую производную:
   (a) $f : E \to \mathbb{R}$, $f(t) = \det(A - tI_n)$, где $A \in \mathbb{R}^{n\times n}$, $E = \{t \in \mathbb{R} : \det(A - tI_n) \neq 0\}$.
   (b) $f : \mathbb{R}_{++} \to \mathbb{R}$, $f(t) = \|(A + tI_n)^{-1}b\|$, где $A \in \mathbb{S}^n_+$, $b \in \mathbb{R}^n$.

4. Для каждой из следующих функций найти градиент ∇f и гессиан $\nabla^2 f$:
   (a) $f : \mathbb{R}^n \to \mathbb{R}$, $f(x) = \frac{1}{2}\|xx^T - A\|_F^2$, где $A \in \mathbb{S}^n$.
   (b) $f : \mathbb{R}\backslash\{0\} \to \mathbb{R}$, $f(x) = \langle x, x\rangle^{\langle x, x\rangle}$.
   (c) $f : \mathbb{R}^n \to \mathbb{R}$, $f(x) = \|Ax - b\|^p$, где $A \in \mathbb{R}^{m\times n}$, $b \in \mathbb{R}^m$, $p \geq 2$.

5. Для каждой из следующих функций f покажите, что второй дифференциал является знакоопределённым (т.е. $d^2 f(x)[dx, dx]$ имеет постоянный знак) и установите этот знак:
   (a) $f : \mathbb{S}^n_{++} \to \mathbb{R}$, $f(X) = \mathrm{tr}(X^{-1})$.
   (b) $f : \mathbb{S}^n_{++} \to \mathbb{R}$, $f(X) = (\det(X))^{1/n}$.

   Подсказка: использовать неравенство Коши-Буняковского.

6. Для каждой из следующих функций найти все точки стационарности и указать значения параметров, при которых они существуют:

   (a) $f : \mathbb{R}^n \to \mathbb{R}$, $f(x) = \langle c, x\rangle + \frac{\sigma}{3}\|x\|^3$, где $c \in \mathbb{R}^n$, $c \neq 0$, $\sigma > 0$.

   (b) $f : E \to \mathbb{R}$, $f(x) = \langle a, x\rangle - \ln(1 - \langle b, x\rangle)$, где $a, b \in \mathbb{R}^n$, $a, b \neq 0$, $E = \{x \in \mathbb{R}^n \mid \langle b, x\rangle < 1\}$.

   (c) $f : \mathbb{R}^n \to \mathbb{R}$, $f(x) = \langle c, x\rangle \exp(-\langle Ax, x\rangle)$, где $c \in \mathbb{R}^n$, $c \neq 0$, $A \in \mathbb{S}^n_{++}$.

7. Пусть $X \in \mathbb{S}^n_{++}$. Вычислите значение следующего выражения:

$$\lim_{k\to+\infty} \operatorname{tr}(X^{-k} - (X^k + X^{2k})^{-1}).$$

8. Рассмотрим метод главных компонент. Пусть имеется выборка $\{x_i\}_{i=1}^N$, $x_i \in \mathbb{R}^D$, которую мы хотим перевести в выборку меньшей размерности d с помощью проектирования на линейное пространство, задаваемое матрицей $P \in \mathbb{R}^{D\times d}$. Ортогональная проекция вектора x на это пространство может быть вычислена как $P(P^TP)^{-1}P^Tx$. Тогда для поиска наилучшей матрицы P рассмотрим следующую задачу оптимизации:

$$F(P) = \sum_{i=1}^N \|x_i - P(P^TP)^{-1}P^Tx_i\|^2 = N \operatorname{tr}((I - P(P^TP)^{-1}P^T)^2 S) \to \min_P .$$

   Здесь $S = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^N x_i x_i^T$ – выборочная матрица ковариации для нормированной выборки.

   (a) Найти градиент $\nabla_P F(P)$, вычисленный для произвольной матрицы с ортогональными столбцами, т.е. $P : P^TP = I$ (*При вычислении дифференциала $dF(P)$ нужно сначала действовать так, как если бы матрица P была произвольной, а потом в полученном выражении пользоваться свойством ортогональности столбцов P*).

   (b) Рассмотрим собственное разложение матрицы S: $S = Q\Lambda Q^T$, где Λ – диагональная матрица с собственными значениями на диагонали, $Q = [q_1|q_2|\dots|q_D] \in \mathbb{R}^{D\times D}$ – ортогональная матрица, состоящая из собственных векторов q_i по столбцам. Требуется доказать, что градиент $\nabla_P F(P)$ равен нулю для матрицы P, состоящей из любых d различных собственных векторов q_i по столбцам. Требуется также доказать, что значение минимума $F(P)$ достигается для матрицы P, состоящей из собственных векторов q_i, отвечающих наибольшим собственным значениям матрицы S.