

В этой работе совершенно отсутствуют какие бы то ни было чертежи. Излагаемые мною методы не требуют ни построений, ни геометрических или механических рассуждений; они требуют только алгебраических операций, подчиненных планомерному и однообразному алгоритму.

—Предисловие к "Аналитической механике"



Рис. 1: Жозеф Луи Лагранж



### Условия оптимальности



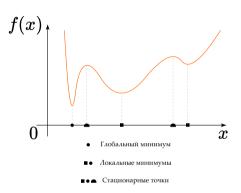


Рис. 2: Иллюстрация различных стационарных (критических) точек



∌ ດ Ø

$$f(x) \to \min_{x \in S}$$

Множество S обычно называется **допустимым множеством** (или **бюджетным множеством**).

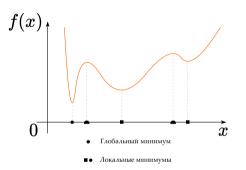


Рис. 2: Иллюстрация различных стационарных (критических) точек

• • Стационарные точки

**♥ ೧ 0** 

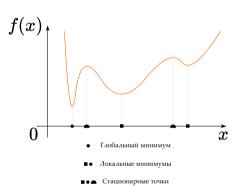


Рис. 2: Иллюстрация различных стационарных (критических) точек

 $f(x) \to \min_{x \in \mathcal{X}}$ 

Множество S обычно называется допустимым множеством (или бюджетным множеством).

Мы говорим, что задача имеет решение, если бюджетное множество, в котором достигается минимум или инфимум данной функции, **не пусто**:  $x^* \in S$ .

**♥ ೧ 0** 

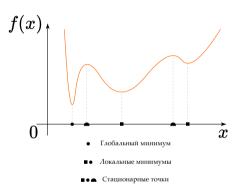


Рис. 2: Иллюстрация различных стационарных (критических) точек

$$f(x)\to \min_{x\in}$$

Множество S обычно называется допустимым множеством (или бюджетным множеством).

Мы говорим, что задача имеет решение, если бюджетное множество, в котором достигается минимум или инфимум данной функции, **не пусто**:  $x^* \in S$ .

• Точка  $x^*$  является глобальным минимумом, если  $f(x^*) \leq f(x)$  для всех  $x \in S$ .

⊕ 0 @

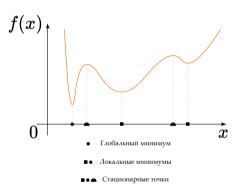


Рис. 2: Иллюстрация различных стационарных (критических) точек

## $f(x)\to \min_{x\in}$

Множество S обычно называется **допустимым множеством** (или **бюджетным множеством**).

Мы говорим, что задача имеет решение, если бюджетное множество, в котором достигается минимум или инфимум данной функции, **не пусто**:  $x^* \in S$ .

- Точка  $x^*$  является глобальным минимумом, если  $f(x^*) \leq f(x)$  для всех  $x \in S$ .
- Точка  $x^*$  является **локальным минимумом**, если существует окрестность N точки  $x^*$  такая, что  $f(x^*) \leq f(x)$  для всех  $x \in N \cap S$ .

⊕ 0 ∅

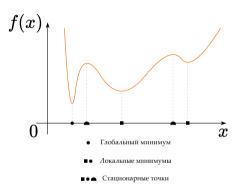


Рис. 2: Иллюстрация различных стационарных (критических) точек

### $f(x) \to \min_{x \in S}$

Множество S обычно называется допустимым множеством (или бюджетным множеством).

Мы говорим, что задача имеет решение, если бюджетное множество, в котором достигается минимум или инфимум данной функции, **не пусто**:  $x^* \in S$ .

- Точка  $x^*$  является глобальным минимумом, если  $f(x^*) \leq f(x)$  для всех  $x \in S$ .
- Точка  $x^*$  является **локальным минимумом**, если существует окрестность N точки  $x^*$  такая, что  $f(x^*) \leq f(x)$  для всех  $x \in N \cap S$ .
- Точка  $x^*$  является **строгим локальным минимумом**, если существует окрестность N точки  $x^*$  такая, что  $f(x^*) < f(x)$  для всех  $x \in N \cap S$  с  $x \neq x^*$ .

େ ଚେ 💎

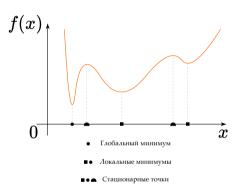


Рис. 2: Иллюстрация различных стационарных (критических) точек

### $f(x) \to \min_{x \in S}$

Множество S обычно называется допустимым множеством (или бюджетным множеством).

Мы говорим, что задача имеет решение, если бюджетное множество, в котором достигается минимум или инфимум данной функции, **не пусто**:  $x^* \in S$ .

- ullet Точка  $x^*$  является глобальным минимумом, если  $f(x^*) \leq f(x)$  для всех  $x \in S$ .
- Точка  $x^*$  является **локальным минимумом**, если существует окрестность N точки  $x^*$  такая, что  $f(x^*) \leq f(x)$  для всех  $x \in N \cap S$ .
- Точка  $x^*$  является **строгим локальным минимумом**, если существует окрестность N точки  $x^*$  такая, что  $f(x^*) < f(x)$  для всех  $x \in N \cap S$  с  $x \neq x^*$ .
- Мы называем точку  $x^*$  стационарной точкой (или критической точкой), если  $\nabla f(x^*) = 0$ . Любой локальный минимум дифференцируемой функции должен быть стационарной точкой.

⊕ 0 @

#### **i** Theorem

Пусть  $S\subset\mathbb{R}^n$  - компактное множество и f(x) - непрерывная функция на S. Тогда точка глобального минимума функции f(x) на S существует.

#### i Theorem

Пусть  $S\subset\mathbb{R}^n$  - компактное множество и f(x) - непрерывная функция на S. Тогда точка глобального минимума функции f(x) на S существует.



Рис. 3: Многие практические задачи теоретически разрешимы

#### **i** Theorem

Пусть  $S\subset\mathbb{R}^n$  - компактное множество и f(x) - непрерывная функция на S. Тогда точка глобального минимума функции f(x) на S существует.



Рис. 3: Многие практические задачи теоретически разрешимы

#### і Теорема Тейлора

Пусть  $f:\mathbb{R}^n o \mathbb{R}$  - непрерывно дифференцируемая функция и  $p\in \mathbb{R}^n.$  Тогда мы имеем:

$$f(x+p) = f(x) + \nabla f(x+tp)^T p$$
 для некоторого  $t \in (0,1)$ 

#### i Theorem

Пусть  $S \subset \mathbb{R}^n$  - компактное множество и f(x) - непрерывная функция на S. Тогда точка глобального минимума функции f(x) на S существует.



Рис. 3: Многие практические задачи теоретически разрешимы

#### і Теорема Тейлора

Пусть  $f:\mathbb{R}^n \to \mathbb{R}$  - непрерывно дифференцируемая функция и  $p \in \mathbb{R}^n$ . Тогда мы имеем:

$$f(x+p) = f(x) + \nabla f(x+tp)^T p$$
 для некоторого  $t \in (0,1)$ 

Кроме того, если f дважды непрерывно дифференцируема, то мы имеем:

$$\nabla f(x+p) = \nabla f(x) + \int_0^1 \nabla^2 f(x+tp) p \, dt$$

$$f(x+p) = f(x) + \nabla f(x)^T p + \frac{1}{2} p^T \nabla^2 f(x+tp) p$$

для некоторого  $t \in (0,1)$ .

### Безусловная оптимизация



1 Необходимое условие оптимальности первого порядка

Если  $x^*$  - локальный минимум и f непрерывно дифференцируема в открытой окрестности, то

$$\nabla f(x^*) = 0$$

1 Необходимое условие оптимальности первого порядка

Если  $x^*$  - локальный минимум и f непрерывно дифференцируема в открытой окрестности, то

$$\nabla f(x^*) = 0$$

#### Доказательство

Предположим от противного, что  $\nabla f(x^*) \neq 0$ . Определим вектор  $p = -\nabla f(x^*)$  и заметим, что

$$p^T\nabla f(x^*) = -\|\nabla f(x^*)\|^2 < 0$$

🕯 Необходимое условие оптимальности первого порядка

Если  $x^st$  - локальный минимум и f непрерывно дифференцируема в открытой окрестности, то

$$\nabla f(x^*) = 0$$

#### Доказательство

Предположим от противного, что  $\nabla f(x^*) \neq 0$ . Определим вектор  $p = -\nabla f(x^*)$  и заметим, что

$$p^T \nabla f(x^*) = -\|\nabla f(x^*)\|^2 < 0$$

Поскольку  $\nabla f$  непрерывна в окрестности  $x^*$ , существует скаляр T>0 такой, что

$$p^T 
abla f(x^* + tp) < 0$$
, для всех  $t \in [0,T]$ 

🕯 Необходимое условие оптимальности первого порядка

Если  $x^st$  - локальный минимум и f непрерывно дифференцируема в открытой окрестности, то

$$\nabla f(x^*) = 0$$

#### Доказательство

Предположим от противного, что  $\nabla f(x^*) \neq 0$ . Определим вектор  $p = -\nabla f(x^*)$  и заметим, что

$$p^T \nabla f(x^*) = -\|\nabla f(x^*)\|^2 < 0$$

Поскольку  $\nabla f$  непрерывна в окрестности  $x^*$ , существует скаляр T>0 такой, что

$$p^T 
abla f(x^* + tp) < 0$$
, для всех  $t \in [0,T]$ 

Для любого  $\bar{t} \in (0,T]$ , мы имеем по теореме Тейлора, что

$$f(x^*+ar t p)=f(x^*)+ar t\, p^T\, 
abla f(x^*+tp),$$
 для некоторого  $\,t\in(0,ar t)\,$ 

### 🕯 Необходимое условие оптимальности первого порядка

Если  $x^st$  - локальный минимум и f непрерывно дифференцируема в открытой окрестности, то

$$\nabla f(x^*) = 0$$

#### Доказательство

Предположим от противного, что  $\nabla f(x^*) \neq 0$ . Определим вектор  $p = -\nabla f(x^*)$  и заметим, что

$$p^T \nabla f(x^*) = -\|\nabla f(x^*)\|^2 < 0$$

Поскольку  $\nabla f$  непрерывна в окрестности  $x^*$ , существует скаляр T>0 такой, что

$$p^T \nabla f(x^* + tp) < 0$$
, для всех  $t \in [0, T]$ 

Для любого  $\bar{t} \in (0,T]$ , мы имеем по теореме Тейлора, что

$$f(x^*+ar t p)=f(x^*)+ar t\, p^T\, 
abla f(x^*+tp),$$
 для некоторого  $\,t\in(0,ar t)\,$ 

Следовательно,  $f(x^*+\bar{t}p) < f(x^*)$  для всех  $\bar{t} \in (0,T]$ . Мы нашли направление из  $x^*$  вдоль которого f убывает, поэтому  $x^*$  не является локальным минимумом, что приводит к противоречию.

1 Достаточные условия оптимальности второго порядка

Пусть  $abla^2 f$  непрерывна в открытой окрестности  $x^*$ , и выполнено

$$\nabla f(x^*) = 0 \quad \nabla^2 f(x^*) \succ 0.$$

Тогда  $x^{st}$  является строгим локальным минимумом функции f.

#### 1 Достаточные условия оптимальности второго порядка

Пусть  $\nabla^2 f$  непрерывна в открытой окрестности  $x^*$ , и выполнено

$$\nabla f(x^*) = 0 \quad \nabla^2 f(x^*) \succ 0.$$

Тогда  $x^*$  является строгим локальным минимумом функции f.

#### Доказательство

Поскольку гессиан непрерывен и положительно определен в  $x^*$ , мы можем выбрать радиус r>0 такой, что  $\nabla^2 f(x)$  остается положительно определенным для всех x в открытом шаре  $B=\{z\mid \|z-x^*\|< r\}$ . Возьмем любой ненулевой вектор p с  $\|p\|< r$ , тогда  $x^*+p\in B$  и поэтому

#### 1 Достаточные условия оптимальности второго порядка

Пусть  $\nabla^2 f$  непрерывна в открытой окрестности  $x^*$ , и выполнено

$$\nabla f(x^*) = 0 \quad \nabla^2 f(x^*) \succ 0.$$

Тогда  $x^*$  является строгим локальным минимумом функции f.

#### Доказательство

Поскольку гессиан непрерывен и положительно определен в  $x^*$ , мы можем выбрать радиус r>0 такой, что  $\nabla^2 f(x)$  остается положительно определенным для всех x в открытом шаре  $B=\{z\mid \|z-x^*\|< r\}$ .

Возьмем любой ненулевой вектор p с  $\|p\| < r$ , тогда  $x^* + p \in B$  и поэтому

$$f(x^* + p) = f(x^*) + p^T \nabla f(x^*) + \frac{1}{2} p^T \nabla^2 f(z) p$$

#### 1 Достаточные условия оптимальности второго порядка

Пусть  $\nabla^2 f$  непрерывна в открытой окрестности  $x^*$ , и выполнено

$$\nabla f(x^*) = 0 \quad \nabla^2 f(x^*) \succ 0.$$

Тогда  $x^*$  является строгим локальным минимумом функции f.

#### Доказательство

Поскольку гессиан непрерывен и положительно определен в  $x^*$ , мы можем выбрать радиус r>0 такой, что  $\nabla^2 f(x)$  остается положительно определенным для всех x в открытом шаре  $B=\{z\mid \|z-x^*\|< r\}$ .

Возьмем любой ненулевой вектор p с  $\|p\| < r$ , тогда  $x^* + p \in B$  и поэтому

$$f(x^* + p) = f(x^*) + p^T \nabla f(x^*) + \frac{1}{2} p^T \nabla^2 f(z) p$$

$$= f(x^*) + \frac{1}{2}p^T\nabla^2 f(z)p$$

#### 🗓 Достаточные условия оптимальности второго порядка

Пусть  $\nabla^2 f$  непрерывна в открытой окрестности  $x^*$ , и выполнено

$$\nabla f(x^*) = 0 \quad \nabla^2 f(x^*) \succ 0.$$

Тогда  $x^*$  является строгим локальным минимумом функции f.

#### Доказательство

Поскольку гессиан непрерывен и положительно определен в  $x^*$ , мы можем выбрать радиус r>0 такой, что  $\nabla^2 f(x)$  остается положительно определенным для всех x в открытом шаре  $B = \{z \mid \|z - x^*\| < r\}$ . Возьмем любой ненулевой вектор p с ||p|| < r, тогда  $x^* + p \in B$  и поэтому

$$f(x^*+p) = f(x^*) + p^T \nabla f(x^*) + \frac{1}{2} p^T \nabla^2 f(z) p$$

$$= f(x^*) + \frac{1}{2}p^T \nabla^2 f(z)p$$

где  $z = x^* + tp$  для некоторого  $t \in (0,1)$ . Поскольку  $z \in B$ , то  $p^T \nabla^2 f(z) p > 0$ , и поэтому  $f(x^* + p) > f(x^*)$ , что доказывает утверждение.

Заметим, что если  $\nabla f(x^*) = 0$ ,  $\nabla^2 f(x^*) \succeq 0$ (гессиан положительно полуопределён), то мы не можем быть уверены, что  $x^*$  является локальным минимумом.

Заметим, что если  $\nabla f(x^*) = 0$ ,  $\nabla^2 f(x^*) \succeq 0$ (гессиан положительно полуопределён), то мы не можем быть уверены, что  $x^*$  является локальным минимумом.

$$f(x,y)=(2x^2-y)(x^2-y)$$

Заметим, что если  $\nabla f(x^*) = 0$ ,  $\nabla^2 f(x^*) \succeq 0$ (гессиан положительно полуопределён), то мы не можем быть уверены, что  $x^*$  является локальным минимумом.

$$f(x,y) = (2x^2 - y)(x^2 - y)$$

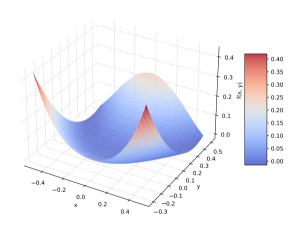
Хотя поверхность не имеет локального минимума в начале координат, ее пересечение с любой вертикальной плоскостью, проходящей через начало координат (плоскость с уравнением u = mx или x = 0) является кривой, которая имеет локальный минимум в начале координат. Другими словами, если точка начинает движение в начале координат (0,0) вдоль любой прямой линии, то значение  $(2x^2-y)(x^2-y)$  будет увеличиваться в начале движения. Тем не менее, (0,0) не является локальным минимумом функции, потому что движение вдоль параболы, такой как  $u = \sqrt{2}x^2$ . приведет к уменьшению значения функции.

Заметим, что если  $\nabla f(x^*)=0,\, \nabla^2 f(x^*)\succeq 0$  (гессиан положительно полуопределён), то мы не можем быть уверены, что  $x^*$  является локальным минимумом.

$$f(x,y) = (2x^2 - y)(x^2 - y)$$

Хотя поверхность не имеет локального минимума в начале координат, ее пересечение с любой вертикальной плоскостью, проходящей через начало координат (плоскость с уравнением y = mx или x = 0) является кривой, которая имеет локальный минимум в начале координат. Другими словами, если точка начинает движение в начале координат (0,0) вдоль любой прямой линии, то значение  $(2x^2-y)(x^2-y)$  будет увеличиваться в начале движения. Тем не менее, (0,0) не является локальным минимумом функции, потому что движение вдоль параболы, такой как  $u = \sqrt{2}x^2$ . приведет к уменьшению значения функции.

#### Non-convex PL function



#### Условная оптимизация





# Общее условие локальной оптимальности первого порядка Вектор $d \in \mathbb{R}^n$ является допустимым

направлением в точке  $x^* \in S \subseteq \mathbb{R}^n$ , если малые шаги вдоль d не выводят нас за пределы S.

Вектор  $d \in \mathbb{R}^n$  является допустимым направлением в точке  $x^* \in S \subseteq \mathbb{R}^n$ . если малые шаги вдоль d не выводят нас за пределы S.

Пусть  $S \subseteq \mathbb{R}^n$  и функция  $f : \mathbb{R}^n \to \mathbb{R}$ . Предположим, что  $x^* \in S$  является точкой локального минимума для fнад S, и предположим далее, что fнепрерывно дифференцируема в

окрестности  $x^*$ .

Вектор  $d \in \mathbb{R}^n$  является допустимым направлением в точке  $x^* \in S \subseteq \mathbb{R}^n$ . если малые шаги вдоль d не выводят нас за пределы S.

Пусть  $S \subseteq \mathbb{R}^n$  и функция  $f : \mathbb{R}^n \to \mathbb{R}$ . Предположим, что  $x^* \in S$  является

точкой локального минимума для fнад S, и предположим далее, что fнепрерывно дифференцируема в окрестности  $x^*$ .

1. Тогда для любого допустимого направления  $d \in \mathbb{R}^n$  в  $x^*$ выполняется  $\nabla f(x^*)^\top d \geq 0$ .

Вектор  $d \in \mathbb{R}^n$  является допустимым направлением в точке  $x^* \in S \subseteq \mathbb{R}^n$ . если малые шаги вдоль d не выводят нас за пределы S.

Пусть  $S \subseteq \mathbb{R}^n$  и функция  $f : \mathbb{R}^n \to \mathbb{R}$ . Предположим, что  $x^* \in S$  является точкой локального минимума для fнад S, и предположим далее, что fнепрерывно дифференцируема в окрестности  $x^*$ .

- 1. Тогда для любого допустимого направления  $d \in \mathbb{R}^n$  в  $x^*$ выполняется  $\nabla f(x^*)^\top d \geq 0$ .
- 2. Если, кроме того, S выпукло, то

$$\nabla f(x^*)^\top (x-x^*) \geq 0, \forall x \in S.$$

Вектор  $d \in \mathbb{R}^n$  является допустимым направлением в точке  $x^* \in S \subseteq \mathbb{R}^n$ . если малые шаги вдоль d не выводят нас за пределы S.

Пусть  $S \subseteq \mathbb{R}^n$  и функция  $f : \mathbb{R}^n \to \mathbb{R}$ . Предположим, что  $x^* \in S$  является точкой локального минимума для fнад S, и предположим далее, что fнепрерывно дифференцируема в окрестности  $x^*$ .

- 1. Тогда для любого допустимого направления  $d \in \mathbb{R}^n$  в  $x^*$ выполняется  $\nabla f(x^*)^\top d \geq 0$ .
- 2. Если, кроме того, S выпукло, то

$$\nabla f(x^*)^\top (x-x^*) \geq 0, \forall x \in S.$$

Вектор  $d \in \mathbb{R}^n$  является допустимым направлением в точке  $x^* \in S \subseteq \mathbb{R}^n$ . если малые шаги вдоль d не выводят нас за пределы S.

Пусть  $S \subseteq \mathbb{R}^n$  и функция  $f : \mathbb{R}^n \to \mathbb{R}$ . Предположим, что  $x^* \in S$  является точкой локального минимума для fнад S, и предположим далее, что fнепрерывно дифференцируема в

- окрестности  $x^*$ . 1. Тогда для любого допустимого направления  $d \in \mathbb{R}^n$  в  $x^*$ выполняется  $\nabla f(x^*)^\top d \geq 0$ . 2. Если, кроме того, S выпукло, то

$$\nabla f(x^*)^\top (x-x^*) \geq 0, \forall x \in S.$$

$$f(x)=x_1+x_2 o \min_{x_1,x_2\in \mathbb{R}^2}$$

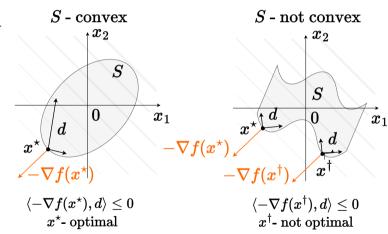


Рис. 4: Общее условие локальной оптимальности первого порядка

Следует отметить, что в выпуклом случае (то есть при выпуклых f и S) необходимое условие становится достаточным.





Следует отметить, что в выпуклом случае (то есть при выпуклых f и S) необходимое условие становится достаточным.

Еще один важный результат для выпуклого случая звучит следующим образом: если  $f(x):S o\mathbb{R}$  выпуклая функция, определённая на выпуклом множестве S, то:

Следует отметить, что в выпуклом случае (то есть при выпуклых f и S) необходимое условие становится достаточным.

Еще один важный результат для выпуклого случая звучит следующим образом: если  $f(x):S o\mathbb{R}$  выпуклая функция, определённая на выпуклом множестве S, то:

• Любой локальный минимум является глобальным.





Следует отметить, что в выпуклом случае (то есть при выпуклых f и S) необходимое условие становится достаточным.

Еще один важный результат для выпуклого случая звучит следующим образом: если  $f(x):S o\mathbb{R}$  выпуклая функция, определённая на выпуклом множестве S, то:

- Любой локальный минимум является глобальным.
- Множество локальных минимумов  $S^*$  выпукло.

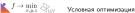




Следует отметить, что в выпуклом случае (то есть при выпуклых f и S) необходимое условие становится достаточным.

Еще один важный результат для выпуклого случая звучит следующим образом: если  $f(x):S o\mathbb{R}$  выпуклая функция, определённая на выпуклом множестве S, то:

- Любой локальный минимум является глобальным.
- Множество локальных минимумов  $S^*$  выпукло.
- Если f(x) строго или сильно выпуклая функция, то  $S^*$  содержит только одну точку:  $S^* = \{x^*\}$ .



В задачах без ограничений всё довольно интуитивно. В этом разделе мы добавим одно ограничение-равенство, то есть:

В задачах без ограничений всё довольно интуитивно. В этом разделе мы добавим одно ограничение-равенство, то есть:

$$f(x)\to \min_{x\in\mathbb{R}^n}$$

$$\mathrm{s.t.}\ h(x)=0$$

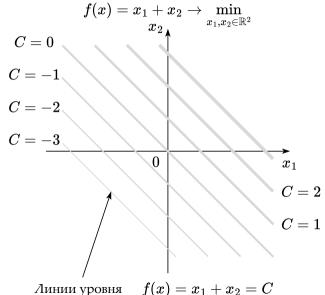


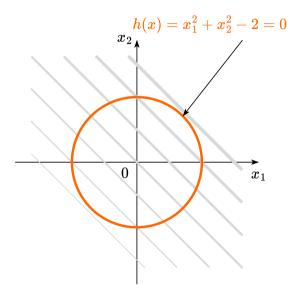


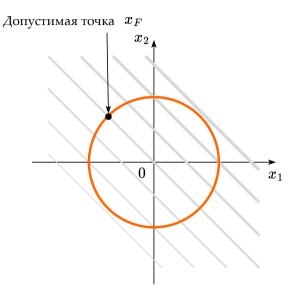
В задачах без ограничений всё довольно интуитивно. В этом разделе мы добавим одно ограничение-равенство, то есть:

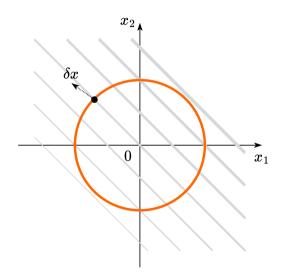
$$f(x) \to \min_{x \in \mathbb{R}^n}$$
 s.t.  $h(x) = 0$ 

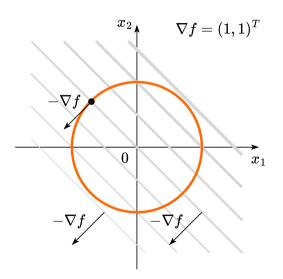
Мы попробуем проиллюстрировать подход к решению этой задачи через простой пример с  $f(x)=x_1+x_2$  и  $h(x) = x_1^2 + x_2^2 - 2$ .

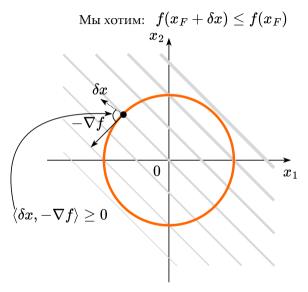


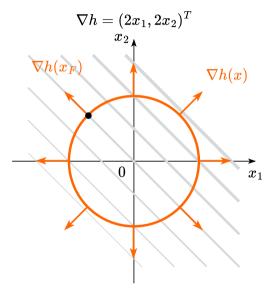


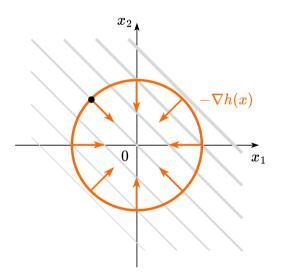


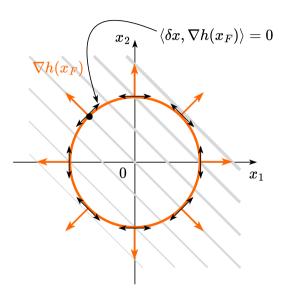












Условная оптимизация

В общем случае, чтобы двигаться от  $x_F$  вдоль допустимого множества и уменьшать значение функции. необходимо обеспечить два условия:



В общем случае, чтобы двигаться от  $x_F$  вдоль допустимого множества и уменьшать значение функции. необходимо обеспечить два условия:

$$\langle \delta x, \nabla h(x_F) \rangle = 0$$



В общем случае, чтобы двигаться от  $x_F$  вдоль допустимого множества и уменьшать значение функции. необходимо обеспечить два условия:

$$\langle \delta x, \nabla h(x_F) \rangle = 0$$

$$\langle \delta x, -\nabla f(x_F) \rangle > 0$$



В общем случае, чтобы двигаться от  $x_F$  вдоль допустимого множества и уменьшать значение функции. необходимо обеспечить два условия:

$$\langle \delta x, \nabla h(x_F) \rangle = 0$$

$$\langle \delta x, -\nabla f(x_F) \rangle > 0$$

Предположим, что в процессе такого движения мы пришли в точку, где



В общем случае, чтобы двигаться от  $x_F$  вдоль допустимого множества и уменьшать значение функции, необходимо обеспечить два условия:

$$\langle \delta x, \nabla h(x_F) \rangle = 0$$

$$\langle \delta x, -\nabla f(x_F) \rangle > 0$$

Предположим, что в процессе такого движения мы пришли в точку, где

$$-\nabla f(x) = \nu \nabla h(x)$$



В общем случае, чтобы двигаться от  $x_E$  вдоль допустимого множества и уменьшать значение функции. необходимо обеспечить два условия:

$$\langle \delta x, \nabla h(x_F) \rangle = 0$$

$$\langle \delta x, -\nabla f(x_F) \rangle > 0$$

Предположим, что в процессе такого движения мы пришли в точку, где

$$-\nabla f(x) = \nu \nabla h(x)$$

$$\langle \delta x, -\nabla f(x) \rangle = \langle \delta x, \nu \nabla h(x) \rangle = 0$$



В общем случае, чтобы двигаться от  $x_E$  вдоль допустимого множества и уменьшать значение функции. необходимо обеспечить два условия:

$$\langle \delta x, \nabla h(x_F) \rangle = 0$$

$$\langle \delta x, -\nabla f(x_F) \rangle > 0$$

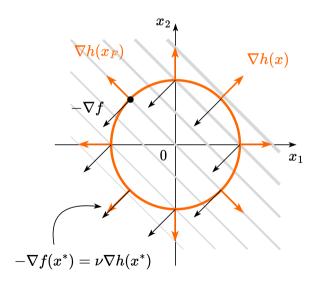
Предположим, что в процессе такого движения мы пришли в точку, где

$$-\nabla f(x) = \nu \nabla h(x)$$

$$\langle \delta x, -\nabla f(x) \rangle = \langle \delta x, \nu \nabla h(x) \rangle = 0$$

Тогда мы достигли такой точки допустимого множества, из которой нельзя уменьшить значение функции при допустимых малых сдвигах. Это и есть условие локального минимума в задаче с ограничением.





Давайте определим лагранжиан (для удобства):

$$L(x,\nu) = f(x) + \nu h(x)$$





Давайте определим лагранжиан (для удобства):

$$L(x,\nu) = f(x) + \nu h(x)$$

Если задача perулярная (мы определим это понятие позже) и точка  $x^*$  является локальным минимумом для описанной выше задачи, то существует  $\nu^*$ :





Давайте определим лагранжиан (для удобства):

$$L(x,\nu) = f(x) + \nu h(x)$$

Если задача  $perynnersize{pr$ описанной выше задачи, то существует  $\nu^*$ :

Необходимые условия

Важно отметить, что  $L(x^*, \nu^*) = f(x^*)$ .



Давайте определим лагранжиан (для удобства):

$$L(x,\nu) = f(x) + \nu h(x)$$

Если задача  $perynnersize{pr$ описанной выше задачи, то существует  $\nu^*$ :

Необходимые условия

$$abla_x L(x^*, 
u^*) = 0$$
 это мы уже написали выше

Важно отметить, что  $L(x^*, \nu^*) = f(x^*)$ .



Давайте определим лагранжиан (для удобства):

$$L(x,\nu) = f(x) + \nu h(x)$$

Если задача  $perynnersize{pr$ описанной выше задачи, то существует  $\nu^*$ :

Необходимые условия

$$abla_x L(x^*, 
u^*) = 0$$
 это мы уже написали выше

$$abla_{
u}L(x^*,
u^*)=0$$
 бюджетное ограничение

Важно отметить, что  $L(x^*, \nu^*) = f(x^*)$ .



$$f(x) \to \min_{x \in \mathbb{R}^n}$$
 s.t.  $h_i(x) = 0, \ i = 1, \dots, p$ 

$$L(x,\nu) = f(x) + \sum_{i=1}^p \nu_i h_i(x) = f(x) + \nu^\top h(x)$$

Пусть f(x) и  $h_i(x)$  дважды дифференцируемы в точке  $x^*$  и непрерывно дифференцируемы в некоторой окрестности  $x^*$ . Условия локального минимума для  $x \in \mathbb{R}^n, \nu \in \mathbb{R}^p$  записываются как

Необходимые условия

$$\nabla_x L(x^*,\nu^*) = 0$$

$$\nabla_{\nu}L(x^*,\nu^*)=0$$

### Задача наименьших квадратов

#### i Example

Поставим задачу оптимизации и решим ее для линейной системы  $Ax=b, A\in\mathbb{R}^{m imes n}$  для трех случаев (предполагая, что матрица имеет полный ранг):

• *m* < *n* 

### Задача наименьших квадратов

#### i Example

Поставим задачу оптимизации и решим ее для линейной системы  $Ax=b, A\in \mathbb{R}^{m imes n}$  для трех случаев (предполагая, что матрица имеет полный ранг):

- *m* < *n*
- $\bullet$  m=n

### Задача наименьших квадратов

#### i Example

Поставим задачу оптимизации и решим ее для линейной системы  $Ax=b, A\in\mathbb{R}^{m imes n}$  для трех случаев (предполагая, что матрица имеет полный ранг):

- *m* < *n*
- $\bullet$  m=n
- m > n





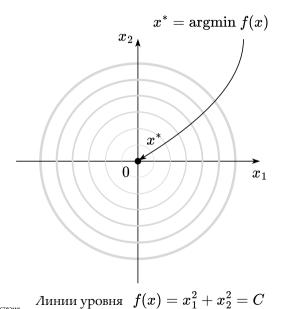
# Пример задачи с ограничениями-неравенствами

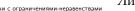
$$f(x) = x_1^2 + x_2^2$$
  $g(x) = x_1^2 + x_2^2 - 1$ 

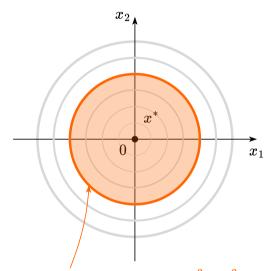
$$f(x)\to \min_{x\in\mathbb{R}^n}$$

$$\text{s.t. } g(x) \leq 0$$

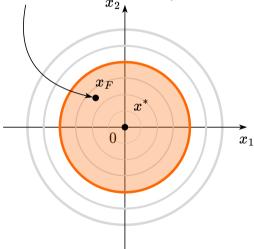




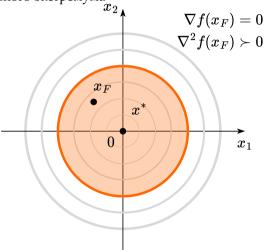




Как понять, что некоторая допустимая точка является локальным минимумом?  $x_2$ 



Просто! Проверим достаточные условия просто.  $x_1$  локального экстремума  $x_2$  л





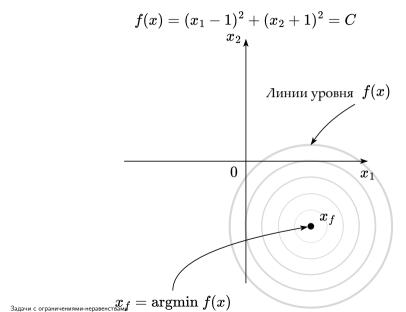
Таким образом, если ограничения типа неравенства неактивны в условной задаче, то мы можем решать задачу без ограничений. Однако так бывает не всегда. Рассмотрим второй простой пример.

$$f(x) = (x_1 - 1)^2 + (x_2 + 1)^2 \quad g(x) = x_1^2 + x_2^2 - 1$$

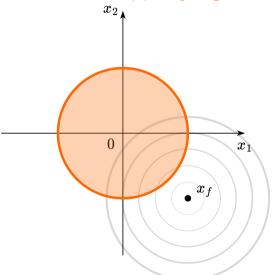
$$f(x) \to \min_{x \in \mathbb{R}^n}$$

$$\text{s.t. } g(x) \leq 0$$

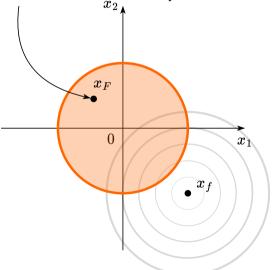




Бюджетное множество  $\ g(x) = x_1^2 + x_2^2 - 1 \leq 0$ 



Как понять, что некоторая допустимая точка является локальным минимумом?  $x_2$ 



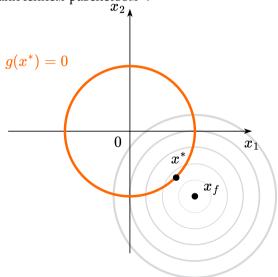


Не так просто! Даже градиент в оптимальной точке не равен нулю  $v_2$  $x_f$ 

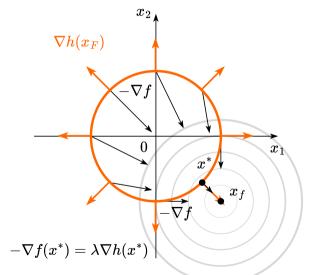




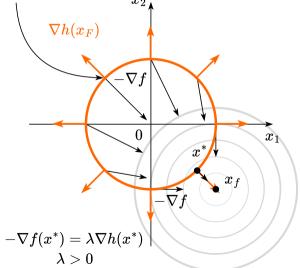
Фактически имеем задачу с ограничением-равенством  $x_2$ 







Не является локальным минимумом, т.к.  $-\nabla f(x)$  направлен внутрь бюджетного множества  $x_2$ 



Итак, у нас есть задача:

$$f(x)\to \min_{x\in\mathbb{R}^n}$$

s.t.  $g(x) \leq 0$ 

Два возможных случая:

$$g(x) \leq 0$$
 неактивно.  $g(x^*) < 0$ 

•  $g(x^*) < 0$ 

Итак, у нас есть задача:

$$f(x)\to \min_{x\in\mathbb{R}^n}$$

$$\text{s.t. } g(x) \leq 0$$

$$g(x) \leq 0$$
 неактивно.  $g(x^*) < 0$ 

- $g(x^*) < 0$
- $\nabla f(x^*) = 0$

Итак, у нас есть задача:

$$f(x)\to \min_{x\in\mathbb{R}^n}$$

$$\text{s.t. } g(x) \leq 0$$

$$g(x) \leq 0$$
 неактивно.  $g(x^*) < 0$ 

• 
$$g(x^*) < 0$$

• 
$$\nabla^2 \hat{f}(x^*) > 0$$



Итак, у нас есть задача:

$$f(x)\to \min_{x\in\mathbb{R}^n}$$

s.t.  $g(x) \leq 0$ 

$$g(x) \leq 0$$
 неактивно.  $g(x^*) < 0$ 

• 
$$g(x^*) < 0$$

• 
$$\nabla^2 \hat{f}(x^*) > 0$$

Итак, у нас есть задача:

$$f(x)\to \min_{x\in\mathbb{R}^n}$$

s.t.  $g(x) \leq 0$ 

$$g(x) \leq 0$$
 неактивно.  $g(x^*) < 0$ 

• 
$$q(x^*) < 0$$

• 
$$\nabla^2 \hat{f}(x^*) > 0$$

$$g(x) \leq 0$$
 активно.  $g(x^*) = 0$ 

$$g(x^*) = 0$$

Итак, у нас есть задача:

$$f(x) \to \min_{x \in \mathbb{R}^n}$$

$$\text{s.t. } g(x) \leq 0$$

$$g(x) \leq 0$$
 неактивно.  $g(x^*) < 0$ 

$$q(x^*) < 0$$

• 
$$\nabla f(x^*) = 0$$

• 
$$\nabla f(x^*) = 0$$
  
•  $\nabla^2 f(x^*) > 0$ 

$$g(x) \leq 0$$
 активно.  $g(x^*) = 0$ 

• 
$$g(x^*) = 0$$

• Необходимые условия: 
$$-\nabla f(x^*) = \lambda \nabla g(x^*)$$
,  $\lambda > 0$ 





## Лагранжиан для задач с ограничениями-неравенствами

Объединяя два возможных случая, мы можем записать общие условия для задачи:

$$f(x) \to \min_{x \in \mathbb{R}^n}$$

$$\text{s.t. } g(x) \leq 0$$

Определим функцию Лагранжа:

$$L(x,\lambda) = f(x) + \lambda g(x)$$

Классические условия Каруша-Куна-Таккера для локального минимума  $x^*$ , сформулированные при некоторых условиях регулярности, можно записать следующим образом.



## Лагранжиан для задач с ограничениями-неравенствами

Объединяя два возможных случая, мы  $\,$  Если  $x^*$  является локальным минимумом для описанной выше задачи, можем записать общие условия для задачи:

то существует единственный множитель Лагранжа 
$$\lambda^*$$
 такой, что: 
$$(1) \ \nabla_x L(x^*,\lambda^*) = 0$$

$$f(x)\to \min_{x\in\mathbb{R}^n}$$

$$\text{s.t. } g(x) \leq 0$$

$$f(x) \to \min_{x \in \mathbb{R}^n}$$

$$L(x,\lambda) = f(x) + \lambda g(x)$$

Классические условия Каруша-Куна-Таккера для локального минимума  $x^*$ , сформулированные при некоторых условиях регулярности, можно записать следующим образом.

$$(2) \ \lambda^* \ge 0$$

$$(3) \lambda^* g(x^*) = 0$$

$$(4) g(x^*) \le 0$$



### Общая формулировка

$$\begin{split} f_0(x) &\to \min_{x \in \mathbb{R}^n} \\ \text{s.t.} \ f_i(x) &\le 0, \ i=1,\dots,m \\ h_i(x) &= 0, \ i=1,\dots,p \end{split}$$

Данная формулировка является общей задачей математического программирования.

Решение включает в себя построение лагранжиана:

$$L(x,\lambda,\nu) = f_0(x) + \sum_{i=1}^m \lambda_i f_i(x) + \sum_{i=1}^p \nu_i h_i(x)$$



Пусть  $x^*$ .  $(\lambda^*, \nu^*)$  является решением задачи математического программирования с нулевым зазором двойственности (оптимальное значение для исходной задачи  $p^*$  равно оптимальному значению для двойственной задачи  $d^*$ ). Пусть также функции  $f_0, f_i, h_i$  дифференцируемы.

•  $\nabla_{m}L(x^{*},\lambda^{*},\nu^{*})=0$ 



- $\nabla_{m}L(x^{*},\lambda^{*},\nu^{*})=0$
- $\nabla_{\cdot \cdot} L(x^*, \lambda^*, \nu^*) = 0$



- $\nabla_{m}L(x^{*},\lambda^{*},\nu^{*})=0$
- $\nabla_{..}L(x^*, \lambda^*, \nu^*) = 0$
- $\lambda_i^* \geq 0, i = 1, ..., m$



- $\nabla_{m}L(x^{*},\lambda^{*},\nu^{*})=0$
- $\nabla_{\cdot \cdot} L(x^*, \lambda^*, \nu^*) = 0$
- $\lambda_i^* > 0, i = 1, ..., m$
- $\lambda_i^* f_i(x^*) = 0, i = 1, ..., m$



• 
$$\nabla_x L(x^*, \lambda^*, \nu^*) = 0$$

• 
$$\nabla_{\nu} L(x^*, \lambda^*, \nu^*) = 0$$

• 
$$\lambda_i^* \geq 0, i = 1, ..., m$$

• 
$$\lambda_i^* f_i(x^*) = 0, i = 1, ..., m$$

• 
$$f_i(x^*) < 0, i = 1, ..., m$$



Эти условия необходимы для того, чтобы условия Каруша-Куна-Таккера стали необходимыми условиями. Некоторые из них даже превращают необходимые условия в достаточные (например, условие Слейтера).

ullet Условие Слейтера. Если для выпуклой задачи (при минимизации, с выпуклыми  $f_0,f_i$  и аффинными  $h_i)$ существует точка x такая, что h(x) = 0 и  $f_{\epsilon}(x) < 0$  (существует строго допустимая точка), то зазор двойственности равен нулю, и условия Каруша—Куна—Таккера становятся необходимыми и достаточными.



Эти условия необходимы для того, чтобы условия Каруша-Куна-Таккера стали необходимыми условиями. Некоторые из них даже превращают необходимые условия в достаточные (например, условие Слейтера).

- ullet **Условие Слейтера.** Если для выпуклой задачи (при минимизации, с выпуклыми  $f_0,f_i$  и аффинными  $h_i)$ существует точка x такая, что h(x) = 0 и  $f_{\epsilon}(x) < 0$  (существует строго допустимая точка), то зазор двойственности равен нулю, и условия Каруша—Куна—Таккера становятся необходимыми и достаточными.
- ullet **Условие линейной квалификации ограничений.** Если  $f_i$  и  $h_i$  являются аффинными функциями, то никаких других условий не требуется.



Эти условия необходимы для того, чтобы условия Каруша-Куна-Таккера стали необходимыми условиями. Некоторые из них даже превращают необходимые условия в достаточные (например, условие Слейтера).

- ullet **Условие Слейтера.** Если для выпуклой задачи (при минимизации, с выпуклыми  $f_0,f_i$  и аффинными  $h_i)$ существует точка x такая, что h(x) = 0 и  $f_{\epsilon}(x) < 0$  (существует строго допустимая точка), то зазор двойственности равен нулю, и условия Каруша—Куна—Таккера становятся необходимыми и достаточными.
- ullet **Условие линейной квалификации ограничений.** Если  $f_i$  и  $h_i$  являются аффинными функциями, то никаких других условий не требуется.
- **Условие линейной независимости ограничений.** Градиенты активных ограничений неравенства и градиенты ограничений равенства линейно независимы в точке  $x^*$ .



Эти условия необходимы для того, чтобы условия Каруша-Куна-Таккера стали необходимыми условиями. Некоторые из них даже превращают необходимые условия в достаточные (например, условие Слейтера).

- ullet **Условие Слейтера.** Если для выпуклой задачи (при минимизации, с выпуклыми  $f_0,f_i$  и аффинными  $h_i)$ существует точка x такая, что h(x) = 0 и  $f_{\epsilon}(x) < 0$  (существует строго допустимая точка), то зазор двойственности равен нулю, и условия Каруша—Куна—Таккера становятся необходимыми и достаточными.
- ullet **Условие линейной квалификации ограничений.** Если  $f_i$  и  $h_i$  являются аффинными функциями, то никаких других условий не требуется.
- **Условие линейной независимости ограничений.** Градиенты активных ограничений неравенства и градиенты ограничений равенства линейно независимы в точке  $x^*$ .
- Для других примеров см. wiki.





$$\min \frac{1}{2}\|\mathbf{x} - \mathbf{y}\|^2, \quad \text{s.t.} \quad \mathbf{a}^T\mathbf{x} = b.$$

$$\min \frac{1}{2}\|\mathbf{x} - \mathbf{y}\|^2, \quad \text{s.t.} \quad \mathbf{a}^T\mathbf{x} = b.$$

#### Решение

Лагранжиан:

 $\min \frac{1}{2} \|\mathbf{x} - \mathbf{y}\|^2, \quad \text{s.t.} \quad \mathbf{a}^T \mathbf{x} = b.$ 

#### Решение

Лагранжиан:

$$L(\mathbf{x},\nu) = \frac{1}{2}\|\mathbf{x} - \mathbf{y}\|^2 + \nu(\mathbf{a}^T\mathbf{x} - b)$$

 $\min \frac{1}{2} \|\mathbf{x} - \mathbf{y}\|^2, \quad \text{s.t.} \quad \mathbf{a}^T \mathbf{x} = b.$ 

#### Решение

Лагранжиан:

$$L(\mathbf{x},\nu) = \frac{1}{2}\|\mathbf{x} - \mathbf{y}\|^2 + \nu(\mathbf{a}^T\mathbf{x} - b)$$

Производная L по  $\mathbf{x}$ :

$$\frac{\partial L}{\partial \mathbf{x}} = \mathbf{x} - \mathbf{y} + \nu \mathbf{a} = 0, \quad \mathbf{x} = \mathbf{y} - \nu \mathbf{a}$$

 $\min \frac{1}{2} \|\mathbf{x} - \mathbf{y}\|^2, \quad \text{s.t.} \quad \mathbf{a}^T \mathbf{x} = b.$ 

#### Решение

Лагранжиан:

$$L(\mathbf{x}, \nu) = \frac{1}{2} \|\mathbf{x} - \mathbf{y}\|^2 + \nu (\mathbf{a}^T \mathbf{x} - b)$$

Производная L по  $\mathbf{x}$ :

$$\frac{\partial L}{\partial \mathbf{x}} = \mathbf{x} - \mathbf{y} + \nu \mathbf{a} = 0, \qquad \mathbf{x} = \mathbf{y} - \nu \mathbf{a}$$

$$\mathbf{a}^T \mathbf{x} = \mathbf{a}^T \mathbf{y} - \nu \mathbf{a}^T \mathbf{a}$$
  $\nu = \frac{\mathbf{a}^T \mathbf{y} - b}{\|\mathbf{a}\|^2}$ 

 $\min \frac{1}{2} \|\mathbf{x} - \mathbf{y}\|^2, \quad \text{s.t.} \quad \mathbf{a}^T \mathbf{x} = b.$ 

Решение

Лагранжиан:

$$L(\mathbf{x}, \nu) = \frac{1}{2} \|\mathbf{x} - \mathbf{y}\|^2 + \nu (\mathbf{a}^T \mathbf{x} - b)$$

Производная L по  $\mathbf{x}$ :

$$\frac{\partial L}{\partial \mathbf{x}} = \mathbf{x} - \mathbf{y} + \nu \mathbf{a} = 0, \qquad \mathbf{x} = \mathbf{y} - \nu \mathbf{a}$$
$$\mathbf{a}^T \mathbf{x} = \mathbf{a}^T \mathbf{y} - \nu \mathbf{a}^T \mathbf{a} \qquad \nu = \frac{\mathbf{a}^T \mathbf{y} - b}{\|\mathbf{a}\|^2}$$

 $\mathbf{x} = \mathbf{y} - \frac{\mathbf{a}^T \mathbf{y} - b}{\|\mathbf{a}\|^2} \mathbf{a}$ 

$$\min \frac{1}{2}\|x-y\|^2, \quad \text{s.t.} \quad x^\top 1 = 1, \quad x \geq 0.$$

$$\min \frac{1}{2}\|x-y\|^2, \quad \text{s.t.} \quad x^\top 1 = 1, \quad x \geq 0.$$

#### Условия ККТ

Лагранжиан задается следующим образом:

$$L = \frac{1}{2} \|x - y\|^2 - \sum_i \lambda_i x_i + \nu (x^\top 1 - 1)$$

$$\min \frac{1}{2}\|x-y\|^2, \quad \text{s.t.} \quad x^\top 1 = 1, \quad x \geq 0.$$

#### **Условия ККТ**

Лагранжиан задается следующим образом:

$$L = \frac{1}{2} \|x - y\|^2 - \sum_i \lambda_i x_i + \nu (x^\top 1 - 1)$$

Взяв производную L по  $x_i$  и записав ККТ, мы получаем: •  $\frac{\partial L}{\partial x_i}=x_i-y_i-\lambda_i+\nu=0$ 

• 
$$\frac{\partial L}{\partial x_i} = x_i - y_i - \lambda_i + \nu = 0$$

$$\min \frac{1}{2}\|x-y\|^2, \quad \text{s.t.} \quad x^\top 1 = 1, \quad x \geq 0.$$

#### **Условия ККТ**

Лагранжиан задается следующим образом:

$$L = \frac{1}{2} \|x - y\|^2 - \sum_i \lambda_i x_i + \nu (x^\top 1 - 1)$$

Взяв производную L по  $x_i$  и записав ККТ, мы получаем: •  $\frac{\partial L}{\partial x_i}=x_i-y_i-\lambda_i+\nu=0$ 

- $\lambda_i \dot{x}_i = 0$

$$\min \frac{1}{2}\|x-y\|^2, \quad \text{s.t.} \quad x^\top 1 = 1, \quad x \geq 0.$$

#### **Условия ККТ**

Лагранжиан задается следующим образом:

$$L = \frac{1}{2} \|x - y\|^2 - \sum_i \lambda_i x_i + \nu (x^\top 1 - 1)$$

Взяв производную L по  $x_i$  и записав ККТ, мы получаем:

- $\frac{\partial L}{\partial x} = x_i y_i \lambda_i + \nu = 0$
- $\lambda_i x_i = 0$
- $\lambda_i > 0$

$$\min \frac{1}{2}\|x-y\|^2, \quad \text{s.t.} \quad x^\top 1 = 1, \quad x \geq 0.$$

#### **Условия ККТ**

Лагранжиан задается следующим образом:

$$L = \frac{1}{2} \|x - y\|^2 - \sum_i \lambda_i x_i + \nu (x^\top 1 - 1)$$

Взяв производную L по  $x_i$  и записав ККТ, мы получаем:

- $\frac{\partial L}{\partial x_i} = x_i y_i \lambda_i + \nu = 0$
- $\lambda_i x_i = 0$
- $\begin{array}{ll} \bullet \ \lambda_i \geq 0 \\ \bullet \ x^\top 1 = 1, \quad x > 0 \end{array}$

$$\min \frac{1}{2}\|x-y\|^2, \quad \text{s.t.} \quad x^\top 1 = 1, \quad x \geq 0.$$

#### **Условия ККТ**

Лагранжиан задается следующим образом:

$$L = \frac{1}{2} \|x - y\|^2 - \sum_i \lambda_i x_i + \nu (x^\top 1 - 1)$$

Взяв производную L по  $x_i$  и записав ККТ, мы получаем:

- $\frac{\partial L}{\partial x_i} = x_i y_i \lambda_i + \nu = 0$
- $\lambda_i x_i = 0$
- $\begin{array}{ll} \bullet \ \lambda_i \geq 0 \\ \bullet \ x^\top 1 = 1, \quad x > 0 \end{array}$

$$\min \frac{1}{2}\|x-y\|^2, \quad \text{s.t.} \quad x^\top 1 = 1, \quad x \geq 0.$$

#### **Условия ККТ**

Лагранжиан задается следующим образом:

$$L = \frac{1}{2} \|x - y\|^2 - \sum_i \lambda_i x_i + \nu (x^\top 1 - 1)$$

Взяв производную L по  $x_i$  и записав ККТ, мы получаем:

- $\frac{\partial L}{\partial x} = x_i y_i \lambda_i + \nu = 0$
- $\lambda_i x_i = 0$
- $\begin{array}{ll} \bullet & \lambda_i \geq 0 \\ \bullet & x^\top 1 = 1, \quad x > 0 \end{array}$

### i Question

Решите систему выше за  $O(n \log n)$ .



$$\min \frac{1}{2}\|x-y\|^2, \quad \text{s.t.} \quad x^\top 1 = 1, \quad x \geq 0.$$

### **Условия ККТ**

Лагранжиан задается следующим образом:

$$L = \frac{1}{2} \|x - y\|^2 - \sum_i \lambda_i x_i + \nu(x^\top 1 - 1)$$

Взяв производную L по  $x_i$  и записав ККТ, мы получаем:

• 
$$\frac{\partial L}{\partial x_i} = x_i - y_i - \lambda_i + \nu = 0$$

$$\lambda_i x_i = 0$$

$$\lambda_{\underline{i}} \geq 0$$

$$\begin{array}{ll} \bullet & \lambda_i \geq 0 \\ \bullet & x^\top 1 = 1, \quad x \geq 0 \end{array}$$

### i Question

Решите систему выше за  $O(n \log n)$ .

Решите систему выше за O(n).

• Лекция по условиям ККТ (очень интуитивное объяснение) в курсе "Элементы статистического обучения" @ KTH.





- Лекция по условиям ККТ (очень интуитивное объяснение) в курсе "Элементы статистического обучения" @ KTH.
- Однострочное доказательство ККТ





- Лекция по условиям ККТ (очень интуитивное объяснение) в курсе "Элементы статистического обучения" @ KTH.
- Однострочное доказательство ККТ
- О втором порядке оптимальности для задач оптимизации с ограничениями неравенства





- Лекция по условиям ККТ (очень интуитивное объяснение) в курсе "Элементы статистического обучения" @ KTH.
- Однострочное доказательство ККТ
- О втором порядке оптимальности для задач оптимизации с ограничениями неравенства
- О втором порядке оптимальности в нелинейной оптимизации





- Лекция по условиям ККТ (очень интуитивное объяснение) в курсе "Элементы статистического обучения" 0 KTH
- Однострочное доказательство ККТ
- О втором порядке оптимальности для задач оптимизации с ограничениями неравенства
- О втором порядке оптимальности в нелинейной оптимизации
- Численная оптимизация by Jorge Nocedal and Stephen J. Wright.



