Немного об общей топологии.

Топологическое пространство

Определение

Топологическим пространством называется упорядоченная пара $\langle X, \Omega \rangle$, где X — некоторое множество, а $\Omega \subseteq \mathcal{P}(X)$, причём:

1. $\varnothing, X \in \Omega$
2. *если $A_1, \ldots, A_n \in \Omega$, то $A_1 \cap A_2 \cap \cdots \cap A_n \in \Omega$;*
3. *если $\{A_\alpha\}$ — семейство множеств из Ω, то и $\bigcup_\alpha A_\alpha \in \Omega$.*

Множество Ω называется топологией. Элементы Ω называются открытыми множествами.

Определение

$\mathcal{B}$ — база топологического пространства $\langle X, \Omega \rangle$ ($\mathcal{B} \subseteq \Omega$), если всевозможные объединения множеств из $\mathcal{B}$ дают Ω.

Примеры топологических пространств

Определение

Эвклидово пространство (экввклидова топология) на $\mathbb{R}$*: база топологии* $\{(x, y) \mid x, y \in \mathbb{R}\}$.

Определение

Дискретная топология: $\langle X, \mathcal{P}(X) \rangle$ *— все множества открыты.*

Определение

Топология стрелки: $\langle \mathbb{R}, \{(x, +\infty) \mid x \in \mathbb{R}\} \cup \{\varnothing, \mathbb{R}\} \rangle$ *— открыты все положительные лучи.*

Подпространства и связные множества

Определение

Пространство $\langle X_1, \Omega_1 \rangle$ *— подпространство пространства* $\langle X, \Omega \rangle$*, если* $X_1 \subseteq X$ *и* $\Omega_1 = \{A \cap X_1 | A \in \Omega\}$*.*

Пример

$[0,1]$ *с эвклидовой топологией на отрезке — подпространство* $\mathbb{R}$*. В нём множество* $[0, 0.5)$ *открыто, так как* $[0, 0.5) = (-0.5, 0.5) \cap [0,1]$*.*

Определение

Пространство $\langle X, \Omega \rangle$ *связно, если нет* $A, B \in \Omega$*, что* $A \cup B = X$*,* $A \cap B = \varnothing$ *и* $A, B \neq \varnothing$*.*

Пример

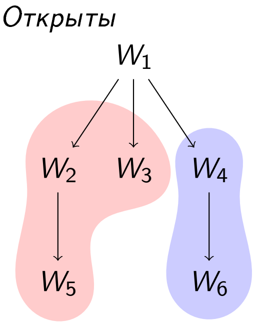
Пространство $(0,1] \cup [2,3)$ *в* $\mathbb{R}$ *несвязно: возьмём* $A = (0,1]$ *и* $B = [2,3)$*.*
Дискретное топологическое пространство $\langle X, \mathcal{P}(X) \rangle$ *несвязно при* $|X| > 1$*: пусть* $a \in X$*, тогда* $A = \{a\}$ *и* $B = X \setminus A$*.*

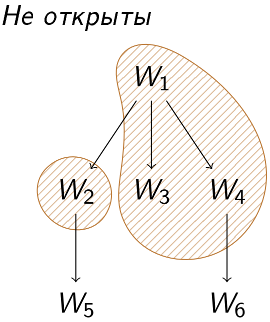
Топология на деревьях

Определение

Пусть некоторый лес задан конечным множеством вершин V и отношением $(\preceq)$, связывающим предков и потомков ($a \preceq b$, если b — потомок a). Тогда подмножество его вершин $X \subseteq V$ назовём открытым, если из $a \in X$ и $a \preceq b$ следует, что $b \in X$.

Пример





Связность деревьев

Лемма

Лес связен (является одним деревом) тогда и только тогда, когда соответствующее ему топологическое пространство связно.

Доказательство.

1. Лес связен: пусть не так и найдутся открытые непустые A, B, что $A \cup B = V$ и $A \cap B = \varnothing$. Пусть $v \in V$ — корень дерева и пусть $v \in A$ (для определённости). Тогда $A = \{x \mid v \preceq x\}$ и $B = \varnothing$.
2. Пусть лес топологически связен, но есть несколько разных корней $v_1, v_2, \ldots, v_k$. Возьмём $A_i = \{x \mid v_i \preceq x\}$. Тогда все A_i открыты, непусты, дизъюнктны и $V = \cup A_i$.

$\square$

Пишем скобки или нет?

Вы как пишете: $\sin x$ или $\sin(x)$?

Пишем скобки или нет?

Вы как пишете: $\sin x$ или $\sin(x)$?

```
int main () {
    return sizeof 0;
}
```

Пишем скобки или нет?

Вы как пишете: $\sin x$ или $\sin(x)$?

```
int main () {
    return sizeof 0;
}
```

Соглашение о записи:

$$\mathrm{sizeof}\ \varnothing = \mathrm{sizeof}(\varnothing) = 0$$

но:

$$\mathrm{sizeof}\{\varnothing\} = \mathrm{sizeof}(\{\varnothing\}) = 1$$

Минимальные и максимальные элементы

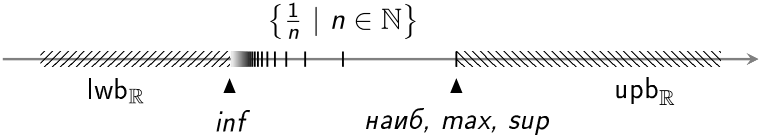
Определение

Множество нижних граней $X \subseteq \mathcal{U}$: $\mathrm{lwb}_{\mathcal{U}} X = \{y \in \mathcal{U} \mid y \preceq x$ *при всех* $x \in X\}$.
Множество верхних граней $X \subseteq \mathcal{U}$: $\mathrm{upb}_{\mathcal{U}} X = \{y \in \mathcal{U} \mid x \preceq y$ *при всех* $x \in X\}$.

Определение

минимальный ($m \in X$): *нет меньшего*	*при всех* $y \in X$, $y \preceq m$ *влечёт* $y = m$
максимальный ($m \in X$): *нет большего*	*при всех* $y \in X$, $m \preceq y$ *влечёт* $y = m$
наименьший ($m \in X$): *меньше всех*	*при всех* $y \in X$ *выполнено* $m \preceq y$
наибольший ($m \in X$): *больше всех*	*при всех* $y \in X$ *выполнено* $y \preceq m$
инфимум: наибольшая нижняя грань	$\inf_{\mathcal{U}} X = \text{наиб}(\mathrm{lwb}_{\mathcal{U}} X)$
супремум: наименьшая верхняя грань	$\sup_{\mathcal{U}} X = \text{наим}(\mathrm{upb}_{\mathcal{U}} X)$

Пример



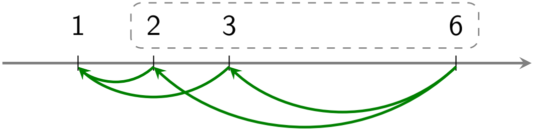
Пример: делимость

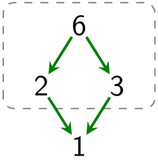
На $\mathbb{N}$ положим $a \preceq b$, если $b \,\vdots\, a$.

Пример

Множество $\{2, 3, 6\}$

Минимальные:	*2,3*	$2 \,\vdots\, x$ *влечёт* $x = 1$ *или* $x = 2$, *то же про 3*
Наименьший:	*отсутствует*	$2 \not\preceq 3$ и $3 \not\preceq 2$
Инфимум:	*1*	$1 \preceq x$ *при всех* $x \in \mathbb{N}$





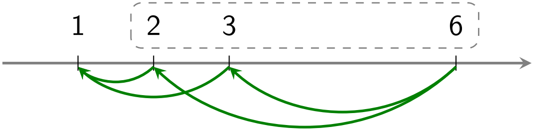
Пример: делимость

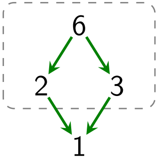
На $\mathbb{N}$ положим $a \preceq b$, если $b \vdots a$.

Пример

Множество $\{2, 3, 6\}$

Минимальные:	*2,3*	$2 \vdots x$ *влечёт* $x = 1$ *или* $x = 2$, *то же про 3*
Наименьший:	*отсутствует*	$2 \not\preceq 3$ и $3 \not\preceq 2$
Инфимум:	*1*	$1 \preceq x$ *при всех* $x \in \mathbb{N}$





Пример

Рассмотрим $X = \{1; 1.4; 1.41; 1.414; 1.4142; \ldots\}$ — *множество десятичных приближений* $\sqrt{2}$, $\preceq \, = \, \leqslant$. *Тогда* $\mathrm{upb}_{\mathbb{Q}}\, X$ *состоит из рациональных чисел, бо́льших* $\sqrt{2}$. *При этом* $\sqrt{2} \notin \mathrm{upb}_{\mathbb{Q}}\, X$, *а значит* $\sup_{\mathbb{Q}} X$ *не определён.*

Пример: внутренность множества

Определение (внутренность множества)

Рассмотрим $\langle X, \Omega \rangle$ *и возьмём* $(\subseteq)$ *как отношение частичного порядка на* $\mathcal{P}(X)$.
Тогда $A^\circ := \inf_\Omega(\{A\})$.

Теорема

A° *определена для любого* A.

Доказательство.

Пусть $V = \mathrm{lwb}_\Omega\{A\} = \{Q \in \Omega \mid Q \subseteq A\}$. Тогда $\inf_\Omega\{A\} = \bigcup V$.
Напомним, $\inf_\mathcal{U} T =$ наиб$(\mathrm{lwb}_\mathcal{U} T)$.

1. Покажем принадлежность: $\bigcup V \subseteq A$ и $\bigcup V \in \Omega$ как объединение открытых.
2. Покажем, что все из V меньше или равны: пусть $X \in V$ то есть $V = \{X, \dots\}$, тогда $X \subseteq X \cup \dots$, тогда $X \subseteq \bigcup V$

$\square$

Решётка

Определение

Решёткой называется упорядоченная пара: $\langle X, (\preceq)\rangle$*, где* X *— некоторое множество, а* $(\preceq)$ *— частичный порядок на* X*, такой, что для любых* $a, b \in X$ *определены* $a + b = \sup\{a, b\}$ *и* $a \cdot b = \inf\{a, b\}$*.*

То есть, $a + b$ — наименьший элемент c, что $a \preceq c$ и $b \preceq c$.

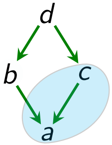
Пример

$\langle \Omega, (\subseteq)\rangle$ *— решётка.* $\langle \mathbb{N} \setminus \{1\}, (\vdots)\rangle$ *— не решётка.*

Псевдодополнение

Псевдодополнением $a \to b$ называется наибольший из $\{x \mid a \cdot x \preceq b\}$.

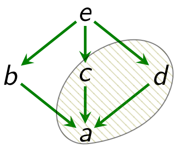
Пример



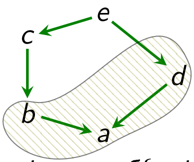
$$a \cdot b = a$$
$$b \cdot b = b$$
$$c \cdot b = a$$
$$d \cdot b = b$$

Здесь $b \to c = \textit{наиб}\{x \mid b \cdot x \preceq c\} = \textit{наиб}\{a, c\} = c$

Пример (нет псевдодополнения: диамант и пентагон)



$b \to c = \textit{наиб}\{a, c, d\}$



$c \to b = \textit{наиб}\{a, b, d\}$

Особые решётки

Определение

Дистрибутивной решёткой называется такая, что для любых a, b, c *выполнено* $a \cdot (b + c) = a \cdot b + a \cdot c$.

Определение

Импликативная решётка — такая, в которой для любых элементов есть псевдодополнение.

Лемма

Любая импликативная решётка — дистрибутивна.

Ноль и один

Определение

0 — наименьший элемент решётки, а 1 — наибольший элемент решётки

Лемма

В любой импликативной решётке $\langle X, (\preceq) \rangle$ *есть 1*

Доказательство.

Рассмотрим $a \to a$, тогда $a \to a = \text{наиб}\{c \mid a \cdot c \preceq a\} = \text{наиб} X = 1$. □

Определение

Импликативная решётка с 0 — псевдобулева алгебра (алгебра Гейтинга). В такой решётке определено $\sim a := a \to 0$

Определение

Булева алгебра — псевдобулева алгебра, в которой $a + \sim a = 1$ *для всех* a.

Булева алгебра является булевой алгеброй в смысле решёток

Доказательство.

Символы булевой алгебры: $(\&), (\vee), (\neg), Л, И$.
Символы решёток: $(+), (\cdot), (\rightarrow), (\sim), 0, 1$
Упорядочивание: $Л \le И$.

1. $a \mathbin{\&} b = \min(a, b)$, $a \vee b = \max(a, b)$ (анализ таблицы истинности), отсюда $a \cdot b = a \mathbin{\&} b$ и $a + b = a \vee b$.
2. $a \rightarrow b = \neg a \vee b$, так как:

$$a \rightarrow b = \text{наиб}\{c | c \mathbin{\&} a \le b\} = \begin{cases} \neg a, & b = Л \\ И, & b = И \end{cases}$$

3. $0 = \min\{И, Л\} = Л$, $1 = \max\{И, Л\} = И$, $\sim a = a \rightarrow 0 = \neg a \vee Л = \neg a$. Заметим, что $a + \sim a = a \vee \neg a = И$.

Итого: булева алгебра — импликативная решётка с 0 и с $a + \sim a = 1$.

□

Множества и топологии как решётки

Лемма
$\langle \mathcal{P}(X), (\subseteq) \rangle$ — *булева алгебра.*

Доказательство.
$a \to b =$ наиб$\{c \subseteq X \mid a \cap c \subseteq b\}$. Т.е. наибольшее, не содержащее точек из $a \setminus b$. Т.е. $X \setminus (a \setminus b)$. То есть $(X \setminus a) \cup b$.
$a + \sim a = a \cup (X \setminus a) \cup \varnothing = X$ $\square$

Лемма
$\langle \Omega, (\subseteq) \rangle$ — *псевдобулева алгебра.*

Доказательство.
$a \to b =$ наиб$\{c \in \Omega \mid a \cap c \subseteq b\}$. Т.е. наибольшее открытое, не содержащее точек из $a \setminus b$. То есть, $(X \setminus (a \setminus b))^\circ$. То есть, $((X \setminus a) \cup b)^\circ$. $\square$

Решётки и исчисление высказываний

Определение

Пусть некоторое исчисление высказываний оценивается значениями из некоторой решётки. Назовём оценку согласованной с исчислением, если $[\![\alpha \mathbin{\&} \beta]\!] = [\![\alpha]\!] \cdot [\![\beta]\!]$, $[\![\alpha \vee \beta]\!] = [\![\alpha]\!] + [\![\beta]\!]$, $[\![\alpha \to \beta]\!] = [\![\alpha]\!] \to [\![\beta]\!]$, $[\![\neg\alpha]\!] = \sim [\![\alpha]\!]$, $[\![A \mathbin{\&} \neg A]\!] = 0$, $[\![A \to A]\!] = 1$.

Теорема

Любая псевдобулева алгебра, являющаяся согласованной оценкой интуиционистского исчисления высказываний, является его корректной моделью: если $\vdash \alpha$, *то* $[\![\alpha]\!] = 1$.

Теорема

Любая булева алгебра, являющаяся согласованной оценкой классического исчисления высказываний, является его корректной моделью: если $\vdash \alpha$, *то* $[\![\alpha]\!] = 1$

Алгебра Линденбаума

Определение

Определим предпорядок на высказываниях: $\alpha \preceq \beta := \alpha \vdash \beta$ *в интуиционистском исчислении высказываний. Также* $\alpha \approx \beta$, *если* $\alpha \preceq \beta$ *и* $\beta \preceq \alpha$.

Определение

Пусть L *— множество всех высказываний. Тогда алгебра Линденбаума* $\mathcal{L} = L/_{\approx}$.

Теорема

$\mathcal{L}$ *— псевдобулева алгебра.*

Схема доказательства.

Надо показать, что $(\preceq)$ есть отношение порядка на $\mathcal{L}$, что $[\alpha \vee \beta]_{\mathcal{L}} = [\alpha]_{\mathcal{L}} + [\beta]_{\mathcal{L}}$, $[\alpha \,\&\, \beta]_{\mathcal{L}}[\alpha]_{\mathcal{L}} = \cdot[\beta]_{\mathcal{L}}$, импликация есть псевдодополнение, $[A \,\&\, \neg A]_{\mathcal{L}} = 0$, $[\alpha]_{\mathcal{L}} \to 0 = [\neg\alpha]_{\mathcal{L}}$. $\square$

Полнота псевдобулевых алгебр

Теорема

Пусть $[\![\alpha]\!] = [\alpha]_{\mathcal{L}}$*. Такая оценка интуиционистского исчисления высказываний алгеброй Линденбаума является согласованной.*

Теорема

Интуиционистское исчисление высказываний полно в псевдобулевых алгебрах: если $\models \alpha$ *во всех псевдобулевых алгебрах, то* $\vdash \alpha$*.*

Доказательство.

Возьмём в качестве модели исчисления алгебру Линденбаума: $[\![\alpha]\!] = [\alpha]_{\mathcal{L}}$. Пусть $\models \alpha$. Тогда $[\![\alpha]\!] = 1$ во всех псевдобулевых алгебрах, в том числе и $[\![\alpha]\!] = 1_{\mathcal{L}}$. То есть $[\alpha]_{\mathcal{L}} = [A \to A]_{\mathcal{L}}$. То есть $A \to A \approx \alpha$. Значит, в частности, $A \to A \vdash \alpha$. Значит, $\vdash \alpha$. $\square$