Uniwersytet Warszawski
Wydział Matematyki, Informatyki i Mechaniki

Filip Binkiewicz
Nr albumu: 332069

Własność A dla kompleksów kostkowych CAT(0)

Praca licencjacka
na kierunku MATEMATYKA

Praca wykonana pod kierunkiem
prof. dr hab. Sławomira Nowaka
Instytut Matematyki

Czerwiec 2015

Oświadczenie kierującego pracą

Potwierdzam, że niniejsza praca została przygotowana pod moim kierunkiem i kwalifikuje się do przedstawienia jej w postępowaniu o nadanie tytułu zawodowego.

Data | Podpis kierującego pracą

Oświadczenie autora (autorów) pracy

Świadom odpowiedzialności prawnej oświadczam, że niniejsza praca dyplomowa została napisana przeze mnie samodzielnie i nie zawiera treści uzyskanych w sposób niezgodny z obowiązującymi przepisami.

Oświadczam również, że przedstawiona praca nie była wcześniej przedmiotem procedur związanych z uzyskaniem tytułu zawodowego w wyższej uczelni.

Oświadczam ponadto, że niniejsza wersja pracy jest identyczna z załączoną wersją elektroniczną.

Data | Podpis autora (autorów) pracy

Streszczenie

Praca ta skupia się na dowodzie, iż kompleksy kostkowe CAT(0) mają własność A.

Słowa kluczowe

Kompleks kostkowy CAT(0), własność A

Dziedzina pracy (kody wg programu Socrates-Erasmus)

11.0 Matematyka, Informatyka:
11.1 Matematyka

Klasyfikacja tematyczna

14 Algebraic Geometry

Tytuł pracy w języku angielskim

Property A for CAT(0) cube complexes

Spis treści

Motywacja

Motywacja bpeaasdgdagafg

Rozdział 1

Wprowadzenie

Pierwszy rozdział tej pracy poświęcę przypomnieniu podstawowych definicji, twierdzeń i przykładów dotyczących jej tematu. Aby zachować ciągłość pracy, postaram się uniknąć przytaczania rozległych dowodów. Dla zainteresowanych w odpowiednich miejscach znajdą się odsyłacze do literatury.

1.1. Własność A

Własność A jest pewnym przeniesieniem pojęcia średniowalności na przestrzenie metryczna. Przed właściwym wprowadzeniem tego pojęcia przypomne kilka podstawowych definicji dotyczących geometrii zgrubnej.

Przez X, Y będziemy oznaczać przestrzenie metryczne, d będzie oznaczać metrykę pochodzącą z przestrzeni, z której pochodzą jej argumenty. Jeśli będzie to konieczne, przez d_X, d_Y będziemy dla ścisłości oznaczać metryki pochodzące odpowiednio z X i Y.

Definicja 1.1.1. Powiemy, że funkcja $\varphi : X \to Y$ jest **zgrubna**, jeśli spełnia następujące dwa warunki:

- (*Bornologiczność*) Dla każdego $R > 0$ istnieje $S > 0$ takie, że
$$d(x_1, x_2) < R \Rightarrow d\left(\varphi(x_1), \varphi(x_2)\right) < S$$
- (*Właściwość*) Dla każdego $S > 0$ istnieje $R > 0$ takie, że
$$d\left(\varphi(x_1), \varphi(x_2)\right) < S \Rightarrow d(x_1, x_2) < R$$

Przykład 1.1.1. Zanurzenie $\mathbb{Z} \hookrightarrow \mathbb{R}$ jest zgrubne. Każde przekształcenie liniowe $\mathbb{Z} \to \mathbb{Z}$, $n \to an+b$ jest zgrubne. Przekształcenie $\mathbb{Z} \ni n \to n^2 \in \mathbb{Z}$ nie jest zgrubne, bo nie jest bornologiczne ($d(n, n+1) = 1$, a $d(n^2, n^2+2n+1) = |2n+1|$ jest dowolnie duże).

Powiemy, że dwa przekształcenia $f_1, f_2 : X \to Y$ są blisko, jeśli istnieje $C > 0$ takie, że

$$d(f_1(x), f_2(x)) < C \text{ dla każdego } x \in X$$

Zbiór $A \subset X$ jest r-gęsty, jeśli dla każdego $x \in X$ istnieje element $a \in A$ taki, że $d(x, a) < r$. Zbiór A jest zgrubnie gęsty, jeśli jest r-gęsty dla pewnego $r > 0$.

Definicja 1.1.2. Powiemy, że przestrzenie X, Y są **zgrubnie równoważne**, jeśli istnieją przekształcenia zgrubne $\varphi : X \to Y$, $\psi : Y \to X$ takie, że $\varphi \circ \psi$ jest blisko id_Y, zaś $\psi \circ \varphi$ jest blisko id_X. Przestrzenie X, Y są zgrubnie równoważne wtedy i tylko wtedy, gdy istnieje $\varphi : X \to Y$ takie, że $\varphi(X) \subset Y$ jest podzbiorem zgrubnie gęstym.

Uwaga 1.1.1. Każda przestrzeń metryczna X zawiera dyskretny podzbiór zgrubnie gęsty.

Dowód. Ustalmy $\varepsilon > 0$. Niech $\mathcal{D} = \{D \subset X : \forall_{x_1,x_2 \in D,\ x_1 \neq x_2}\ d(x_1, x_2) > \varepsilon\}$. Rodzina $\mathcal{D}$ jest niepusta oraz każdy łańcuch jest ograniczony z góry przez swoją sumę. Wobec lematu Kuratowskiego- Zorna istnieje więc maksymalny element $D_0 \in \mathcal{D}$. Jest on ε- gęstym podzbiorem X. Istotnie, załóżmy przeciwnie - istnieje $x \in X$ taki, że $d(x, D_0) > \varepsilon$. Wtedy zbiór $D_0 \cup \{x\}$ należy do rodziny $\mathcal{D}$ i zawiera w sobie D_0, co przeczy maksymalności D_0 □

Definicja 1.1.3. Przestrzeń dyskretna X ma **własność A**, jeśli dla każdego $R > 0$ oraz $\varepsilon > 0$ istnieje rodzina niepustych, skończonych zbiorów $A_x \subset X \times \mathbb{N}$ indeksowana $x \in X$ oraz stała $S > 0$ taka, że spełnione są następujące warunki:

1. Dla każdych dwóch $x, x' \in X$ zachodzi

$$d(x, x') < R \Rightarrow \frac{\#(A_x \Delta A_{x'})}{\#A_x} < \varepsilon$$

2. Dla dowolnego elementu $(x', n) \in A_x$ zachodzi

$$d(x, x') \leqslant S$$

Dowolna przestrzeń metryczna ma własność A, jeśli zawiera zgrubnie gęsty podzbiór o tej własności.

Symbol # oznacza liczbę elementów zbioru, zaś symbol Δ - operację różnicy symetrycznej (a więc $A \Delta B = (A \setminus B) \cup (B \setminus A)$)

Uwaga 1.1.2. Własność A jest niezmiennikiem zgrubnej równoważności przestrzeni dyskretnych. Dokładniej, jeśli przestrzenie dyskretne X, Y są zgrubnie równoważne, to X ma własność A wtedy i tylko wtedy, gdy Y ma własność A.

Uwaga ta jest bezpośrednią konsekwencją poniższego lematu:

Lemat 1.1.1. *Jeśli $\varphi : X \to Y$ jest przekształceniem zgrubnym przestrzeni dyskretnych oraz Y ma własność A, to X ma własność A.*

Dowód. Łatwo sprawdzić, że istnieje funkcja $\psi : Y \to X$ taka, że

$$d(y, \varphi(\psi(y))) \leqslant d(y, \varphi(X)) \text{ dla każdego } y \in Y$$

W tym celu wystarczy dla każdego $y \in Y$ wybrać $x \in X$ taki, że $\varphi(x)$ jest odpowiednio blisko y i ustalić $x = \psi(y)$.

Ustalmy teraz $R > 0,\ \varepsilon > 0$. Przekształcenie φ jest zgrubne, zatem istnieje R_0 takie, że

$$d(x, x') < R \Rightarrow d(\varphi(x), \varphi(x')) < R_0$$

Dla stałych R_0, ε istnieje rodzina $\{B_y \subset Y \times \mathbb{N}\}_{y \in Y}$ indeksowana $y \in Y$ oraz stała S' spełniającaewarunki definicji własności A. Zdefiniujmy teraz

$$X \times \mathbb{N} \supset A_x = \{(x', n) :\ n \leqslant \#\{(y, m) \in B_{\varphi(x)} :\ \psi(y) = x'\}\}$$

Sprawdzimy, że rodzina ta spełnia warunki definicji 1.3.3. Jeśli $d(x, x') < R$, to $d(\varphi(x), \varphi(x')) < R'$, a więc

$$\frac{\#(A_x \Delta A_{x'})}{\#A_x} \leqslant \frac{\#B_{\varphi(x)} \Delta B_{\varphi(x')}}{\#B_{\varphi(x)}} < \varepsilon$$

Załóżmy wreszcie, że $(x', n) \in A_x$. Wówczas istnieje para $(y, m) \in B_{\varphi(x)}$ taka, że $\psi(y) = x'$. Wówczas $d(y, \varphi(x)) \leqslant S'$ oraz

$$d(\varphi(x), \varphi(x')) \leqslant d(\varphi(x), y) + d(y, \varphi(x')) = d(\varphi(x), y) + d(y, \varphi(\psi(y))) \leqslant 2S' + 1$$

Korzystając znów ze zgrubności φ, możemy znaleźć stałą S taką, aby

$$d(\varphi(x), \varphi(x')) < 2S' + 1 \Rightarrow d(x, x') < S$$

Otrzymujemy więc, że $d(x, x') < S$, co kończy dowód. □

W dalszych rozważaniach będziemy korzystać z następującej charakteryzacji własności A:

Stwierdzenie 1.1.1. Dyskretna przestrzeń metryczna X ma własność A wtedy i tylko wtedy, gdy istnieje ciąg rodzin funkcji o skończonym nośniku $f_{n,x} : X \to \mathbb{N} \cup \{0\}$, indeksowany $x \in X$, oraz ciąg $S_n \in \mathbb{R}_+$ taki, że

1. Dla każdego n oraz x nośnikiem $f_{n,x}$ jest $B(S_n, x)$.
2. Dla każdego $R > 0$ ciąg
$$\frac{\|f_{n,x} - f_{n,x'}\|}{\|f_{n,x}\|}$$
zbiega jednostajnie do zera na zbiorze $\{(x, x') : \ d(x, x') \leqslant R\}$ przy $n \to \infty$. Norma $\|\cdot\|$ oznacza normę ℓ_1 na przestrzeni funkcji na o skończonym nośniku określonych na X.

Dowód. Powyższe warunki są równoważne z następującym: dla każdego $R > 0$, $\varepsilon > 0$ istnieje rodzina funkcji o skończonym nośniku $f_x : X \to \mathbb{N} \cup \{0\}$, indeksowana $x \in X$, oraz $S > 0$ takie, że $\mathrm{supp} f_x = B(S, x)$ oraz

$$d(x, x') \leqslant R \Rightarrow \frac{\|f_x - f_{x'}\|}{\|f_x\|} < \varepsilon$$

Konieczność tego warunku wynika stąd, że przekształcenie $f_x(y) = \#\left(A_x \cap (\{y\} \times \mathbb{N})\right)$ spełnia powyższe warunki, zaś dostateczność - stąd, iż $A_x = \{(y, n) \in X \times \mathbb{N} : \ 1 \leqslant n \leqslant f_x(y)\}$ spełnia warunki definicji 1.3.3. □

1.2. Przestrzenie CAT(0)

Niech (X, d) będzie przestrzenią metryczną. Odcinkiem geodezyjnym nazywamy przekształcenie izometryczne $\mathbb{R} \supset I \xrightarrow{\rho} X$, gdzie $I = [a, b]$ jest odcinkiem. Przestrzeń X nazwiemy (jednoznacznie) geodezyjną, jeśli każde dwa punkty można połączyć (jednoznacznie wyznaczonym) odcinkiem geodezyjnym.

Przykład 1.2.1. Każda przestrzeń euklidesowa $\mathbb{R}^n$ jest jednoznacznie geodezyjna, jak również każdy jej wypukły podzbiór. Sfera S^2 jest geodezyjna, ale nie jednoznacznie - dwa bieguny można połączyć ścieżką geodezyjną na nieskończenie wiele sposobów. Każdy spójny graf metryczny jest przestrzenią geodezyjną.

Dalej będziemy rozważać przestrzenie geodezyjne. Dla wygody przez $[x, y]$ będziemy oznaczać (dowolny) odcinek geodezyjny łączący $x \in X$ z $y \in X$ (a dokładniej obraz tego odcinka).

Zwróćmy uwagę, że jeśli X jest przestrzenią geodezyjną, to dla każdej trójki $(x, y, z) \in X^3$ istnieje trójka $(\overline{x}, \overline{y}, \overline{z}) \in \left(\mathbb{R}^2\right)^3$ taka, że $d(x, y) = d_{\mathbb{R}^2}(\overline{x}, \overline{y})$, $d(x, z) = d_{\mathbb{R}^2}(\overline{x}, \overline{z})$, $d(y, z) = d_{\mathbb{R}^2}(\overline{y}, \overline{z})$. Innymi słowy, każdemu trójkątowi z X można przypisać trójkąt z przestrzeni euklidesowej $\mathbb{R}^2$ o bokach takiej samej długości. Taki trójkąt jest wyznaczony jednoznacznie z dokładnością do izometrii przestrzeni $\mathbb{R}^2$ i nazwiemy go trójkątem porównania (x, y, z).

Definicja 1.2.1. Powiemy, że przestrzeń geodezyjna X jest **CAT(0)**, jeśli dla każdej trójki $(x, y, z) \in X^3$ oraz punktu $p \in [y, z]$ oraz odpowiadającym im trójkątowi porównania $(\overline{x}, \overline{y}, \overline{z}) \in (\mathbb{R}^2)^3$ i punktowi $\overline{p} \in [\overline{y}, \overline{z}]$ zachodzi nierówność:

$$d(x, p) \leqslant d_{\mathbb{R}^2}(\overline{x}, \overline{p})$$

Innymi słowy, w przestrzeniach CAT(0) trójkąty są „szczuplejsze" niż w przestrzeni euklidesowej. O takich przestrzeniach powiemy, że mają niedodatnią krzywiznę.

Przykład 1.2.2. Nietrudno jest o kilka przykładów takich przestrzeni:

- Każda przestrzeń euklidesowa $\mathbb{R}^n$ jest CAT(0). Wówczas wymieniona nierówność jest po prostu równością.
- Graf metryczny jest przestrzenią CAT(0) wtedy i tylko wtedy, gdy jest drzewem.

Uwaga 1.2.1. Każda przestrzeń CAT(0) jest jednoznacznie geodezyjna.

Dowód. Przypuśćmy przeciwnie i niech $x, y \in X$ łączą dwa różne odcinki geodezyjne, powiedzmy $[x, y], \overline{[x, y]}$. Wówczas istnieją $[x, y] \ni p \neq \overline{p} \in \overline{[x, y]}$ takie, że $d(x, p) = d(x, \overline{p})$ oraz $d(y, p) = d(y, \overline{p})$. Wówczas trójkątowi $(x, y, \overline{p})$ w $\mathbb{R}^2$ odpowiada trójkąt zdegenerowany, zaś $d(p, \overline{p}) > 0$, co przeczy nierówności CAT(0) $\square$

Wniosek 1.2.1. Sfera S^2 nie jest przestrzenią CAT(0). Płaszczyzna $\mathbb{R}^2$ wyposażona w metrykę pochodzącą od normy ℓ_1 nie jest przestrzenią CAT(0)

1.3. Kompleksy kostkowe CAT(0)

Niech $K = [0, 1]^n$ będzie n-wymiarową kostką. Będzie to podstawowy „budulec" interesujących nas przestrzeni. Przez ścianę o kowymiarze równym 1 będziemy rozumieć zbiór

$$F_{i,\varepsilon} = \{x \in K : \ x_i = \varepsilon\}, \quad \text{dla } i = 1 \ldots n \text{ oraz } \varepsilon \in \{0, 1\}$$

Wszystkie ściany o niższym kowymiarze (o wyższym wymiarze) można otrzymać jako przecięcie ścian o wyższym kowymiarze.

Definicja 1.3.1. Niech K, K' będą dwiema kostkami oraz $F \subset K, \ F' \subset K'$ będą ich ścianami. **Sklejeniem** (lub **przyłączeniem**) K z K' nazwiemy izometrię $\varphi : F \to F'$.

Definicja 1.3.2. Przypuśćmy, że $\mathcal{K}$ jest zbiorem kostek (dla każdego $K \in \mathcal{K}$ istnieje $n(K) \in \mathbb{N}$ takie, że $K \simeq [0, 1]^{n(K)}$), zaś $\mathcal{S}$ - zbiorem sklejeń elementów $\mathcal{K}$ (każdemu $\varphi \in \mathcal{S}$ odpowiadają kostki $K = K(\varphi), K' = K'(\varphi) \in \mathcal{K}$ oraz ściany $F \subset K, F' \subset K'$. Załóżmy wreszcie, że taka para $(\mathcal{K}, \mathcal{S})$ spełnia następujące warunki:

1. Żadna kostka nie jest sklejona sama ze sobą.
2. Dla każdych dwóch kostek $K \neq K'$ istnieje co najwyżej jedno sklejenie K z K'.

Wówczas w następujący sposób można zdefiniować **kompleks kostkowy**:

$$X = \left(\bigsqcup_{K \in \mathcal{K}} C \right) \Big/ \sim$$

gdzie $\sim$ dla każdego $\varphi \in \mathcal{S}$ utożsamia dziedzinę φ z jego obrazem, to znaczy:

$$\{x \sim \varphi(x) \mid \varphi \in \mathcal{S},\ x \in \mathrm{dom}(\varphi)\}$$

Jeśli istnieje stała $M > 0$ taka, że dla każdego $K \simeq [0,1]^{n(K)} \in \mathcal{K}$ zachodzi $n(K) < M$, to kompleks kostkowy X jest **skończenie wymiarowy**. Wtedy **wymiarem** tego kompleksu nazwiemy liczbę

$$\dim X = \max_{K \in \mathcal{K}} n(K)$$

Uwaga 1.3.1. W ten sposób zdefiniowany kompleks kostkowy jest przestrzenią metryczną, przy czym metryka długości[1] indukowana jest z metryki euklidesowej na $[0,1]^n \subset \mathbb{R}^n$. Odległość punktów x, y mierzona w metryce długości jest to infinum długości krzywych $\gamma : [a,b] \to X$ łączących x z y. Długość krzywej definiujemy następująco:

$$l(\gamma) = \sup_{a=t_0 \leqslant \cdots \leqslant t_n = b} \sum_{i=0}^{n-1} d(\gamma(t_i), \gamma(t_{i+1}))$$

Stwierdzenie 1.3.1. Z powyższej definicji łatwo wynikają następujące fakty:

- Obcięcie rzutowania $p : \bigsqcup_{K \in \mathcal{K}} \to X$ do jednej kostki $K \in \mathcal{K}$ jest iniekcją.
- Niepuste przecięcie dwóch kostek jest ścianą obydwu.

Przykład 1.3.1. Łatwo o kilka prostych przykładów kompleksów kostkowych:

- Rozważmy graf metryczny bez wierzchołków izolowanych, w którym każda krawędź ma długość 1. Każda krawędź jest izometryczna z $[0,1]$, zaś sklejenia to po prostu izometrie punktów. Jest to prosty przykład kompleksu kostkowego.
- Torus można interpretować jako kompleks kostkowy. Rozważmy zbiór $[0,3] \times [0,3] \subset \mathbb{R}^2$, w którym można wprowadzić podział na dziewięć części izometrycznych z $[0,1]^2$. Wtedy odpowiednie izometrie prowadzą do konstrukcji torusa (rysunek).

Uwaga 1.3.2. Na zbiorze wierzchołków można wprowadzić metrykę długości krawędziowej, gdzie odległość dwóch wierzchołków to minimum długości łączących ich ścieżek złożonych z krawędzi kompleksu (przez krawędź rozumiemy ścianę o wymiarze 1). Z naszego punktu widzenia możemy utożsamić te metryki, z uwagi na następujący fakt:

Stwierdzenie 1.3.2. Niech X będzie kompleksem kostkowym CAT(0). Metryka długości na zbiorze wierzchołków X jest zgrubnie równoważna z metryką długości krawędziowej. Jeśli X jest skończenie wymiarowy, to zbiór wierzchołków z pierwszą bądź drugą z tych metryk jest sobie zgrubnie równoważny.

Dowód. $\square$

Kompleksy kostkowe CAT(0) posiadają strukturę kombinatoryczną. Zbiór wierzchołków drogowo spójnego kompleksu kostkowego CAT(0) można podzielić na dwa drogowo spójne podzbiory zbioru wierzchołków. Taki podział nazwiemy **hiperpłaszczyzną**, zaś oba spójne podzbiory nazwiemy **półprzestrzenią**.

Dwie hiperpłaszczyzny tworzą podział kompleksu na cztery przecięcia półpłaszczyzn. Jeśli wszystkie są niepuste, to hiperpłaszczyzny **przecinają się**. Dwa wierzchołki x, y są**oddzielone** przez hiperpłaszczyznę H, jeśli należą do różnych wyznaczonych przez nią półprzestrzeni.

[1] length metric

Zbiór hiperpłaszczyzn oddzielających x od y będziemy oznaczać przez $\mathfrak{H}(x,y)$. **Odcinkiem** łączącym x oraz y nazwiemy przecięcie wszystkich półprzestrzeni zawierających obydwa te punkty i oznaczymy $[x,y]$. Zbiór wierzchołków V nazwiemy **wypukłym**, jeśli dla każdych $x,y \in V$ również $[x,y] \subset V$.

Dla trzech wierzchołków w,x,y możemy wyróżnić ich **medianę**, zdefiniowaną jako jedyny wierzchołek należący do $[w,x] \cap [x,y] \cap [w,y]$

Dla kompleksu kostkowego CAT(0) X możemy wprowadzićbrzeg kombinatoryczny. Niech funkcja σ przypisuje hiperpłaszczyźnie X jedną z wyznaczonych przez nią półprzestrzeni, przy czym dla każdych dwóch hiperpłaszczyzn H_1, H_2 zachodzi $\sigma(H_1) \cap \sigma(H_2) \neq \emptyset$. Taką funkcję nazwiemy **ultrafiltrem**.

Wierzchołek x definiuje takie przekształcenie: dla hiperpłaszczyzny H wyznacza półprzestrzeń H_x zawierającą x (rzeczywiście, dla każdych dwóch hiperpłaszczyzn H,K mamy $x \in H \cap K$). Jeśli więc oznaczymy przez $\mathfrak{U}$ zbiór wszystkich ultrafiltrów na X, zaś przez $V(X)$ - zbiór wierzchołków X, to wskazaliśmy iniekcję

$$\iota : V(X) \to \mathfrak{U}$$

Wówczas elementy zbioru

$$\partial X = \mathfrak{U} \setminus \iota(V(X))$$

nazwiemy **krawędziami w nieskończoności**. Utożsamiając z wierzchołkiem x ultrafiltr $\iota(x)$, możemy więc zdefiniować

$$\overline{X} = X \cup \partial X$$

Powyższy zbiór nazwiemy **dopełnieniem w nieskończoności** kompleksu X.

Możemy przenieść podstawowe kombinatoryczne własności kompleksu kostkowego CAT(0) na jego dopełnienie w nieskończoności. Jeśli $z,w \in \overline{X}$, to dla hiperpłaszczyzny H przez H_z, H_w będziemy oznaczać obraz z,w (jako ultrafiltrów) na H, a więc odpowiednią półprzestrzeń (wtedy powiemy, że H_z zawiera z. Hiperpłaszczyzna H **oddziela** x od w, jeśli $H_z \neq H_w$. Można więc na $\overline{X}$ uogólnić definicję zbioru $\mathfrak{H}(x,w)$. Podobnie możemy zdefiniować odcinek $[x,w]$ jako

$$[x,w] = \bigcap H_{x,w} \quad x,w \in H_{x,w},\ H_{x,w} - \text{ półprzestrzeń}$$

Zwróćmy uwagę, że każdy odcinek $[x,w]$ jest wypukły. Wynika to stąd, że przecięcie zbiorów wypukłych takie jest. Oczywiste jest również następujące stwierdzenie:

Stwierdzenie 1.3.3. Niech $x,y,w \in X$ oraz $x \in \overline{X}$. Jeśli $w \in [x,z]$ oraz $y \in [y,w]$, to $\mathfrak{H}(y,w) \subset \mathfrak{H}(y,z)$

Uwaga 1.3.3. Na zbiorze $\overline{X}$ trudno wprowadzić metrykę, można natomiast w naturalny sposób zrobić z niego przestrzeń topologiczną. Powiemy, że ciąg wierzchołków $\{x_j\}_{j=1}^{\infty} \subset X$ zbiega do wierzchołka $x \in \overline{X}$, jeśli dla każdej hiperpłaszczyzny H zachodzi $H \in \mathfrak{H}(x_j,x)$ jedynie dla skończenie wielu j. Piszemy wówczas, że

$$x_j \xrightarrow{j\to\infty} x$$

Sekcję tę zakończymy serią lematów i twierdzeniem łączącym kompleks kostkowy z przestrzenią euklidesową.

Lemat 1.3.1. *Niech $\{x_j\}_{j=1}^{\infty} \subset X, x \in \overline{x}$ oraz niech $x_j \to x$ przy $j \to \infty$. Hiperpłaszczyzna H oddziela y od x wtedy i tylko wtedy, gdy oddziela y od prawie wszystkich*[2] *x_j. Inaczej:*

$$\mathfrak{H}(y,x) = \bigcup_{k=1}^{\infty} \bigcap_{j=k}^{\infty} \mathfrak{H}(y,x_j)$$

[2]wszystkich, oprócz skończenie wielu

Dowód. Wystarczy wspomnieć definicję: H oddziela y od x wtedy i tylko wtedy, gdy $H_y \neq H_z$, a więc wtedy i tylko wtedy, gdy $H_y \neq H_{x_j}$ dla prawie wszystkich $j \in \mathbb{N}$. $\square$

Lemat 1.3.2. *Niech $\{x_j\}_{j=1}^{\infty} \subset X, x \in \overline{X}$ oraz niech $x_j \to x$ przy $j \to \infty$. Ponadto niech $y, z \in X$. Wówczas jeden i tylko jeden z poniższych warunków jest prawdziwy.*

- *$y \in [z, x_j]$ dla prawie wszystkich $j \in \mathbb{N}$ (wtedy $y \in [z, x]$).*
- *$y \notin [z, x_j]$ dla prawie wszystkich $j \in \mathbb{N}$ (wtedy $y \notin [z, x]$).*

Dowód. Negacją warunku pierwszego jest warunek: $y \notin [z, x_j]$ dla nieskończenie wielu $j \in \mathbb{N}$. Wynika on łatwo z drugiego warunku. Pokażemy, że warunek drugi jest mu równoważny.

Jeśl $y \notin [z, x_j]$, to istnieje $H \in \mathfrak{H}(y, z)$ taka, że $H_z = H_{x_j}$. Jeśli jest tak dla nieskończenie wielu j, to ze skończoności zbioru $\mathfrak{H}(y, z)$ wynika, że istnieje hiperpłaszczyzna $H \in \mathfrak{H}(y, z)$ taka, że $H_z = H_{x_j}$ dla nieskończenie wielu $j \in \mathbb{N}$. Zatem $H_z = H_x = H_{x_j}$ dla prawie wszystkich $j \in \mathbb{N}$. W szczególności $y \notin [z, x_j]$ dla niemal wszystkich j, a więc $y \notin [z, x]$.

Pozostaje wykazać, że pierwszy warunek pociąga za sobą, że $y \in [z, x]$. Załóżmy że $y \notin [z, x]$. Istnieje więc hiperpłaszczyzna $H \in \mathfrak{H}(y, z)$ taka, że $H_x = H_z$, a więc $H_{x_j} = H_z$ dla niemal wszystkich $j \in \mathbb{N}$. A więc $y \notin [z, x_j]$ dla prawie wszystkich $j \in \mathbb{N}$ i otrzymujemy sprzeczność. $\square$

Lemat 1.3.3. *Niech $x, y \in X$ oraz $z \in \overline{X}$. Wówczas przecięcie odcinków $[x, y], [x, z], [y, z]$ składa się z pojedynczego wierzchołka z X.*

Dowód. Najpierw wykażemy, że przecięcie to jest niepuste, następnie - że ma tylko jeden element.

Niech $\{z_j\}_{j=1}^{\infty} \subset X$ będzie ciągiem wierzchołków zbieżnym do z. Odcinek $[x, y]$ jest skończony i zawiera mediany $m_j = m(x, y, z_j)$. Istnieje więc $m \in [x, y]$ taki, że $m = m_j \in [x, z_j]$ dla nieskończenie wielu $j \in \mathbb{N}$. Z poprzedniego lematu wynika więc,że $m \in [x, z_j]$ dla niemal wszystkich $j \in \mathbb{N}$ oraz $m \in [x, z]$. Podobnie $m \in [y, z]$.

Załóżmy teraz, że $m \neq m'$ należą do $[x, y] \cap [x, z] \cap [y, z]$ i niech $H \in \mathfrak{H}(m, m')$. Któreś dwie z półprzestrzenie H_x, H_y, H_z są sobie równe; dla ustalenia uwagi niech $H_x = H_y$. Skoro $H_m \neq H_{m'}$, tylko jedno z nich może być równe H_x, zatem znowu dla ustalenia uwagi niech $H_m \neq H_x$. Wtedy $m \notin [x, z]$, co daje sprzeczność. $\square$

Uwaga 1.3.4. W powyższym dowodzie skorzystaliśmy z faktu, że mamy ciąg $X \ni z_j \to z \in \overline{X}$. Istnienie takiego ciągu nie jest zupełnie oczywiste - aby je uzasadnić, należy rozważyć zbiór wszystkich hiperpłaszczyzn $H_1, H_2, \ldots$ (jest on przeliczalny) oraz dla każdego $j \in \mathbb{N}$ wybrać z_j należące do zbioru

$$\bigcap_{i=1}^{j} (H_i)_z$$

Aby uzasadnić, że powyższy zbiór jest niepusty, wystarczy skorzystać z twierdzenia Helly'ego mówiącego o przecięciach zbiorów wypukłych.

Dla $x \in X, z \in \overline{X}$ przez $\mathfrak{R}_z(x)$ oznaczymy podzbiór $\mathfrak{H}(x, z)$ złożony z tych hiperpłaszczyzn, które oddzielają x od z oraz pewnego sąsiada x.

Lemat 1.3.4. *Niech X będzie kompleksem kostkowym CAT(0) oraz $\dim X < \infty$. Ponadto niech $x \in X, z \in \overline{X}$. Wówczas $\#\mathfrak{R}_z(x) \leqslant \dim X$*

Dowód. Dowód można znaleźć w (BCGNW) lemat 1.13 $\square$

W następnym twierdzeniu uzasadnimy, że odcinki łączące wierzchołki (być może w nieskończoności) zanurzają się w odpowiednio dużą przestrzeń euklidesową. W oczywisty sposób $\mathbb{R}^d$ możemy postrzegać jako kompleks kostkowy (patrz przykład 1.3.1). Zbiorem wierzchołków jest krata $\mathbb{Z}^d$. Odcinkami są prostopadłościany - dokładniej, jeśli $\overline{x} = (x_1, \dots, x_d), \overline{y} = (y_1, \dots, y_d) \in \mathbb{Z}^d$, to odcinkiem $[\overline{x}, \overline{y}]$ jest powłoka wypukła podzbioru $\mathbb{Z}^d$ złożonego z tych liczb, których i-ta współrzędna jest z przedziału $[x_i, y_i]$ lub $[y_i, x_i]$. Żeby włączyć do naszych rozważań wierzchołki w nieskończoności, dopuszczamy możliwość, że x_i lub $y_i = \pm\infty$ dla pewnego $i = 1 \dots d$.

Twierdzenie 1.3.1. *Niech X będzie skończenie wymiarowym kompleksem kostkowym CAT(0), $\dim X = d$ oraz niech $x, y \in \overline{X}$. Wówczas odcinek $[x, y]$ zanurza się izometrycznie w kompleksie kostkowym $\mathbb{R}^d$.*

Wprowadźmy na zbiorze $\mathfrak{H}(x, y)$ częściowy porządek w następujący sposób:

$$H \preceq K \iff H_x \subset K_x$$

Lemat 1.3.5. *Dwie płaszczyzny $H, K \in \mathfrak{H}(x, y)$ nie sąporównywalne w tym porządku wtedy i tylko wtedy, gdy się przecinają.*

Dowód. Oczywiste jest, że $H_x \cap K_x \neq \emptyset \neq H_y \cap K_y$. Dalej, $H_x \cap K_y = \emptyset \iff H_x \subset K_x \wedge H_y \cap K_x = \emptyset \iff K_x \subset H_x$. H oraz K są więc nieporównywalne przez $\preceq$ wtedy i tylko wtedy, gdy $K_x \not\subset H_x$ oraz $H_x \not\subset K_x$, a więc wtedy, gdy wszystkie cztery przecięcia są niepuste. $\square$

Lemat 1.3.6 (Dilworth)**.** *Niech $(S, \preceq)$ będzie zbiorem częściowo uporządkowanym. Łańcuchem nazwiemy podzbiór S, którego elementy są parami porównywalne, antyłańcuchem - podzbiór S nieposiadający dwóch różnych elementów porównywalnych. Jeśli zbiór S nie zawiera antyłańcucha o mocy $m + 1$, to S jest sumą rozłączną m łańcuchów.*

Dowód. Można znaleźć w (Dilworth, a decomposition theorem for partially ordered sets). $\square$

Wniosek 1.3.1. Zbiór częściowo uporządkowany $(\mathfrak{H}(x, y), \preceq)$ jest sumą rozłączną d łańcuchów.

Dowód. Wystarczy skorzystać z twierdzenia Helly'ego, lematu Dilwortha oraz lematu 1.3.5 $\square$

Dowód twierdzenia 1.3.1. Dowód tego twierdzenia przeprowadzimy tylko dla przypadku, gdy x jest wierzchołkiem X. Weźmy rozkład zbioru $\mathfrak{H}(x, y)$ na łańcuchy, którego istnienia dostarcza poprzedni lemat

$$\mathfrak{H}(x, y) = \bigsqcup_{i=1}^{d} \mathfrak{B}_i$$

Niech teraz

$$X \supset [x, y] \ni z \to \overline{z} = (\overline{z_1}, \dots, \overline{z_d}) \in \mathbb{Z}^d, \ \overline{z_i} = \#\{H \in \mathfrak{B}_i : \ z \in H_y\}$$

Wówczas $\overline{x} = 0$, zaś $\overline{y} = (\overline{y_1}, \dots, \overline{y_d})$, gdzie $\overline{y_i} = \#\mathfrak{B}_i, i = 1 \dots d$. Dla każdego $z \in [x, y]$ współrzędne $\overline{z}$ są skończone oraz $\overline{z} \in [\overline{x}, \overline{y}]$.

Funkcja $z \to \overline{z}$ zanurzeniem izometrycznym. Żeby to sprawdzić, wystarczy obliczyć:

$$d(\overline{v}, \overline{w}) = \sum_{i=1}^{d} \#\{H \in \mathfrak{B}_i : \ H \in \mathfrak{H}(v, w)\} = \#\mathfrak{H}(v, w) = d(v, w)$$

$\square$

1.4. Kombinacje

Funkcje, spełniające warunki Stwierdzenia 1.1.1. będziemy konstruować przy użyciu dwumianu Newtona, a więc funkcji $\binom{n}{k}$. Kombinatorycznie funkcja ta oznacza *liczbę k-podzbiorów n-zbioru*, w szczególności jej definicja jest poprawna dla całkowitych $n \geqslant k \geqslant 0$. Przy użyciu łatwej interpretacji kombinatorycznej można udowodnić relację rekurencyjną:

- $\binom{n}{0} = \binom{n}{n} = 1$ dla $n \geqslant 0$.
- $\binom{n}{k} = \binom{n-1}{k-1} + \binom{n-1}{k}$

Można łatwo uogólnić tę funkcję dla wszystkich $n, k \in \mathbb{Z}$ poprzez relację:

- $\binom{n}{0} = 1$ dla $n \geqslant 0$ oraz $\binom{n}{n} = 1$ dla $n \in \mathbb{Z}$
- $\binom{n}{k} = \binom{n-1}{k-1} + \binom{n-1}{k}$ dla wszystkich $n, k \in \mathbb{Z}$

Z powyższej definicji łatwo udowodnićkilka własności:

- $\binom{n}{k} = 0$ dla $k < 0 \leqslant n$
- $\binom{n}{k} = (-1)^{n+k}\binom{-1-r}{-1-n}$

Szczególnie przydatna okaże się druga własność, dla $k = -1$. Przyjmuje wtedy ona formę

$$\binom{n}{-1} = (-1)^{n-1}\binom{0}{-1-n}$$

Rozdział 2

Kompleksy kostkowe CAT(0) a własność A