

Topologia I*

Seria I.

Przestrzenie homeomorficzne ze sferą

Jacek Karwowski, Szymon Pajzert

Uwaga wstępna: Jeśli nie jest inaczej uściślone, wszelkie referencje odnoszą się do *Pomocnika studenta* [1]

Problem

Udowodnij, że dla $n > 0$ następujące przestrzenie są homeomorficzne:

- 1) Sfera S^n
- 2) $\mathbb{R}^{n+1} \setminus \{0\} / \sim$ gdzie $\mathbf{v} \sim \mathbf{w} \iff \exists \lambda > 0 \mathbf{v} = \lambda \mathbf{w}$
- 3) $(\mathbb{R}^n)^+$ - sfera Riemanna
- 4) D^n / \sim gdzie $x \sim y \iff x = y$ lub $x, y \in S^{n-1}$
- 5) $S^p \times S^q$ z utożsamionym do punktu zbiorem $\alpha \times S^q \cup S^p \times \beta$, dla $p + q = n$ gdzie α oraz β są odpowiednio pewnymi wektorami z S^p oraz S^q .
- 6) $(D^p \times S^q) \cup (S^{p-1} \times D^{q+1})$ gdzie $p + q = n$

Udowodnij że sfera jest łukowo spójna oraz jest 2-rozmaitością.

Sfera jest rozmaitością

Na mocy homeomorfizmu pomiędzy 1) oraz 3) wiemy że po wyjęciu jednego punktu ze sfery S^n jest ona homeomorficzna z \mathbb{R}^n . Wyjmując dwa różne od siebie punkty otrzymamy dwa otwarte zbiory homeomorficzne z \mathbb{R}^n , których suma daje S^n .

Sfera jest łukowo spójna

Dla dowolnych dwóch różnych nieantypodycznych punktów na sferze możemy obrać odcinek między nimi, homeomorficzny z $[0, 1]$. Możemy później dokonać projekcji tego odcinka na współliniowe z nim i początkiem układu współrzędnych punkty sfery, co jak pokazaliśmy przy homeomorfizmie 1) z 6) jest przekształceniem homeomorficznym.

Dla punktów antypodycznych możemy obrać łuk do pewnego pośredniego punktu, co pokazaliśmy na wykładzie.

1 - 2

Homeomorfizm pomiędzy

1) Sferą S^n

2) $\mathbb{R}^{n+1} \setminus \{0\} / \sim$ gdzie $\mathbf{v} \sim \mathbf{w} \iff \exists \lambda > 0 \mathbf{v} = \lambda \mathbf{w}$

- **(zwartość dziedziny)** Sfera S^n jest zbiorem zwartym: jest domkniętą i ograniczoną podprzestrzenią przestrzeni euklidesowej.
- **(ciągłość g)** Weźmy przekształcenia

$$f : S^n \rightarrow \mathbb{R}^{n+1} \setminus \{0\}$$

$$p : \mathbb{R}^{n+1} \setminus \{0\} \rightarrow \mathbb{R}^{n+1} \setminus \{0\} / \sim$$

Przekształcenie f jest włożeniem homeomorficznym, przekształcenie jest przekształceniem ilorazowym.

Weźmy

$$g : S^n \rightarrow \mathbb{R}^{n+1} \setminus \{0\} / \sim$$

Jest ono ciągle, ponieważ jest złożeniem f i p - przekształcenia ilorazowego z przekształceniem ciągłym

Wprowadźmy nowy układ współrzędnych, naturalnie związany z homeomorfizmem

$$\eta : \mathbb{R}^n \rightarrow S^{n-1} \times \mathbb{R}$$

Niech pierwsza współrzędna będzie promieniem sfery o środku w 0, na której leży punkt, a druga położeniem na tej sferze.

Weźmy dwa różne elementy $a, b \in X$, wtedy ich współrzędne to:

$$a = (a_r, a_s)$$

$$b = (b_r, b_s)$$

Przekształcenie p jest utożsamieniem punktów o tej samej pierwszej współrzędnej.

- **(bijektywność g)** Reprezentantami warstw w X mogą być więc wektory należące do sfery jednostkowej S^n - to pokazuje, że g jest bijekcją (każdej warstwie odpowiada jeden wektor na sferze jednostkowej).

- **(hausdorffowość przeciwdziedziny)** Sfera S^n jest Hausdorfa, można dla dwóch wektorów do niej należących można wybrać rozłączne otoczenia otwarte U_a i U_b . Zbiory

$$V_a = p[U_a]$$

$$V_b = p[U_b]$$

są rozłączne w X . Załóżmy że nie. Wtedy istnieją $\alpha \in U_a, \beta \in U_b$ takie, że $p(\alpha) = p(\beta)$, czyli $\alpha * t = \beta$ dla jakiegoś $t > 0$, ale oba należą do sfery jednostkowej, więc sprzeczność.

Pozostaje jedynie sprawdzić, że V_a i V_b są otwarte w X .

Weźmy $W = p^{-1}[V_a]$ oraz $x = (1, x_s) \in W$. Zrzutujmy W na sferę o promieniu 1 i weźmy otwartą kulę wokół punktu x na tej sferze zawierającą się w rzucie W o promieniu r_x - można to zrobić, bo ten rzut jest otwarty.

Weźmy teraz kulę o promieniu $\min(1, r_x)$ - jest ona zawarta w zbiorze W , bo punkty do niej należące po zrzutowaniu na sferę S^n zawierają się w rzucie W . Wobec tego W jest otwarty i przestrzeń $\mathbb{R}^{n+1} \setminus \{0\} / \sim$ jest przestrzenią Hausdorffa.

Wiemy zatem, że g jest ciągłą bijekcją z przestrzeni zwartej w przestrzeń Hausdorffa, więc jest homeomorfizmem.

1-3

Homeomorfizm pomiędzy

- 1) Sferą S^n
- 3) $(\mathbb{R}^n)^+$ - sfera Riemanna

- **Sfera S^n bez punktu jest homeomorficzna z \mathbb{R}^n**

Zanurzamy wszystko w \mathbb{R}^{n+1} , bierzemy sferę o środku w $(0, \dots, 0, 1)$ promieniu 1 oraz hiperpłaszczyznę n -wymiarową taką, że ostatnia współrzędna jest równa 0, tzn zbiór $\{(a_1, \dots, a_n, 0) : a_i \in \mathbb{R}\}$. Weźmy teraz rzut stereograficzny $h : S^n \setminus \{(0, \dots, 0, 1)\} \rightarrow \mathbb{R}^n$ takie, że $h(x) = y \iff x, y, (0, \dots, 0, 2)$ są współliniowe, czyli zapisując wzorem

$$h((x_1, \dots, x_n)) = \left(\frac{x_1}{2 - x_n}, \frac{x_2}{2 - x_n}, \dots, \frac{x_{n-1}}{2 - x_n}, 0 \right)$$

Funkcja ta jest ciągła, bo jest ciągła na każdej współrzędnej, z arytmetycznych własności funkcji ciągłych. Jest różnowartościowa, bo prosta albo jest cała zawarta w hiperpłaszczyźnie (niemożliwe, bo przecina punkt nienależący do niej), albo przecina ją w jednym punkcie, albo jest z nią rozłączna (nie jest, bo przecina punkty o różnych współrzędnych x_{n+1}). Można więc mówić o funkcji odwrotnej na obrazie $h[S^n]$ - jest ona dana wzorem

$$h^{-1}((p_1, \dots, p_n, 0)) = (p_1 * (2 - S), p_2 * (2 - S), \dots, p_{n-1} * (2 - S), S)$$

$$S = \frac{2 * (p_1^2 + \dots + p_n^2)}{1 + p_1^2 + \dots + p_n^2}$$

h^{-1} jest różnowartościowa - widać to ze wzoru, więc h jest bijekcją. Z drugiej strony, h^{-1} jest ciągła (każda z funkcji współrzędnych jest ciągła), więc h jest homeomorfizmem.

- **Sfera S^n jest zwarta**

Jest domkniętą i ograniczoną podprzestrzenią przestrzeni euklidesowej, więc jest zwarta.

- **Dołożenie punktu jest uzwarceniem sfery bez punktu**

Sfera $S^n \setminus (0, 0, \dots, 1)$ jest zbiorem gęstym w S^n oraz jest zanurzone w niej homeomorficznie. W takim razie S^n jest uzwarceniem $S^n \setminus (0, 0, \dots, 1)$.

- **Przestrzeń $(\mathbb{R}^n)^+$ jest uzwarceniem przestrzeni \mathbb{R}^n**

Przestrzeń $(\mathbb{R}^n)^+$ jest zwarta: załóżmy, że mamy pokrycie zbiorami $U_{i \in I}$. Wybierzmy spośród nich taki, który zawiera punkt w nieskończoności. Wtedy pozostałe z nich są pokryciem zwartej podprzestrzeni

\mathbb{R}^n (z definicji $(\mathbb{R}^n)^+$), więc można z nich wybrać podpokrycie skończone. Dodatkowo \mathbb{R}^n jest gęsta w $(\mathbb{R}^n)^+$, bo jeśli dopełnienie każdego zbioru otwartego zawierającego punkt w nieskończoności jest zwarte, to w szczególności nie jest całą przestrzenią \mathbb{R}^n , więc każdy taki zbiór ma z nią niepuste przecięcie. \mathbb{R}^n jest zanurzony homeomorficznie w $(\mathbb{R}^n)^+$, bo topologia w $(\mathbb{R}^n)^+$ zawiera topologię \mathbb{R}^n . W takim razie $(\mathbb{R}^n)^+$ jest jednopunktowym uzwarceniem \mathbb{R}^n .

$S^n \setminus \{(0, \dots, 0, 1)\}$ jest więc homeo z \mathbb{R}^n , więc z twierdzenia ich jednopunktowe uzwarcenia są homeomorficzne.

3 - 4

Homeomorfizm pomiędzy

3) $(\mathbb{R}^n)^+$ - sferą Riemanna

4) D^n / \sim gdzie $x \sim y \iff x = y$ lub $x, y \in S^{n-1}$

Łatwo możemy obrać homeomorficzne przekształcenie z $D^n \setminus S^{n-1}$ do R^n - rozciągając punkty na odcinku $[0, 1)$ w $[0, +\infty)$ dla każdej półprostej o początku w początku układu współrzędnych.

Sfera Riemanna jest uzwarceniem R^n a D^n / \sim jest uzwarceniem $D^n \setminus S^{n-1}$. Pierwsze uzwarcenie wynika wprost z definicji. W drugim dopełnienie każdego zbioru otwartego zawierającego klasę abstrakcji brzegu jest zbiorem domkniętym. Ponieważ D^n / \sim jest Hausdorffowskim obrazem zwartej przestrzeni w przekształceniu ilorazowym, to sama jest zwarta. Stąd dopełnienie każdego zbioru otwartego zawierającego brzeg jest zwarte, stąd D^n / \sim jest rzeczywiście uzwarceniem. Ponieważ są to jednopunktowe uzwarcenia homeomorficznych lokalnie zwartych przestrzeni to na mocy Twierdzenia Aleksandrowa są one homeomorficzne.

1-5

Homeomorfizm pomiędzy

1) Sferą S^n

5) $S^p \times S^q$ z utożsamionym do punktu zbiorem $\alpha \times S^q \cup S^p \times \beta$, dla $p + q = n$ gdzie α oraz β są odpowiednio pewnymi wektorami z S^p oraz S^q .

Z samego rachunku na zbiorach i z zadania 1-3 (sfera S^n bez punktu homeomorficzna z R^n) otrzymujemy

$$S^p \times S^q / \sim = (S^p \times (R^q \cup \{1\})) / \sim = (S^p \times R^q \cup S^p \times \{1\}) / \sim = ((R^p \cup \{1\}) \times R^q \cup S^p \times \{1\}) / \sim = (R^p \cup \times R^q \cup$$

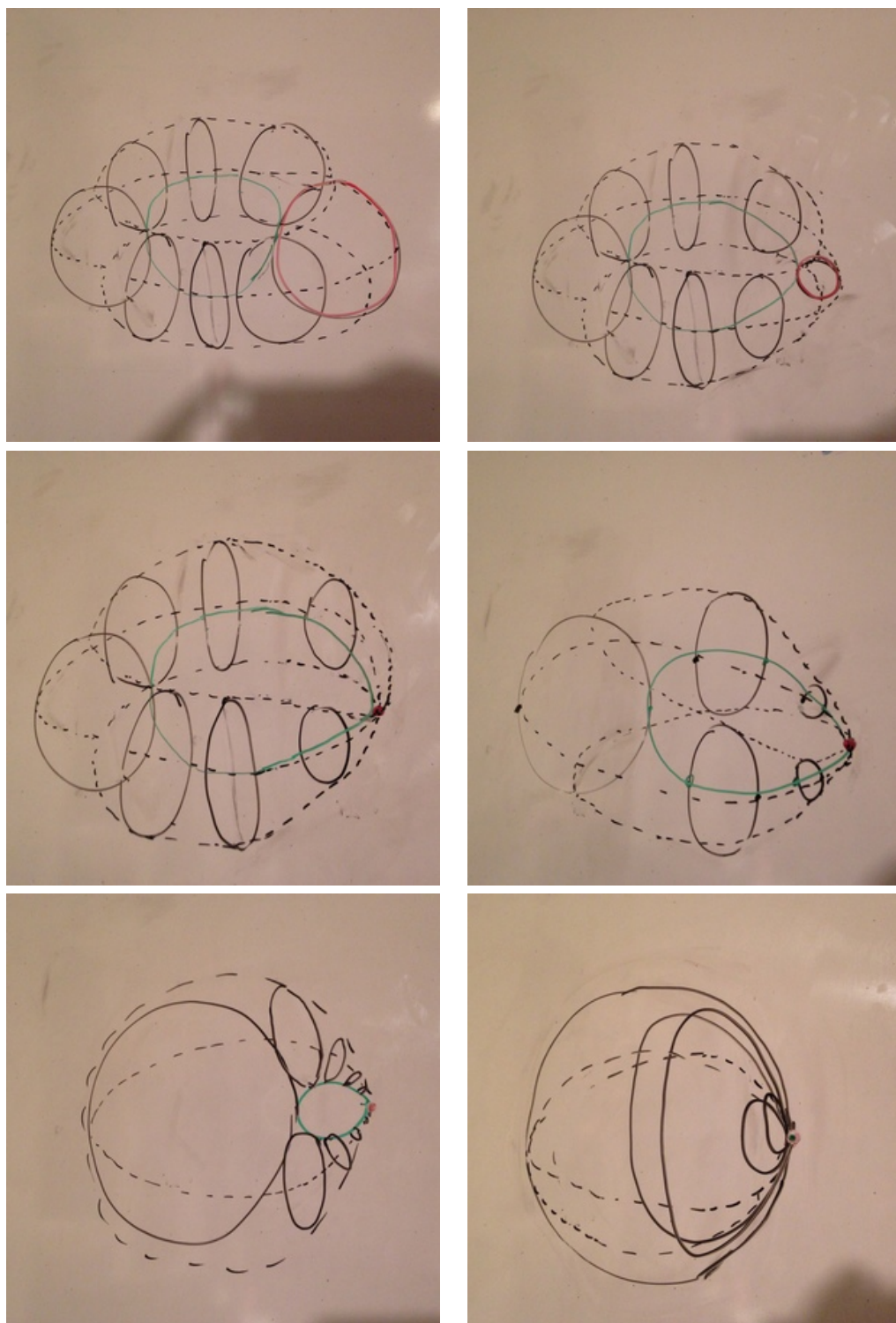
ale

$$\{1\} \times R^q \subset \{1\} \times S^q$$

więc

$$(R^p \cup \times R^q \cup \{1\} \times R^q \cup S^p \times \{1\}) / \sim = R^p \times R^q \cup \{c\} = R^n \cup \{c\}$$

Po usunięciu $\{c\}$ (punktu, do którego utożsamiliśmy $S^p \times \{1\} \cup \{1\} \times S^q$) dostajemy homeomorfizm między $S^p \times S^q / \sim \setminus \{c\}$ a R^n . Ale po dodaniu tego punktu $S^p \times S^q / \sim$ jest zwarte, więc homeomorficzne z jednopunktowym uzwarceniem R^n - a to, z punktu 1.3 jest homeomorficzne z S^n .



Rysunek 1: Wizualizacja dla $p = q = 2$

1 - 6

Homeomorfizm pomiędzy

1) Sferą S^n

6) $A = (D^p \times S^q) \cup (S^{p-1} \times D^{q+1})$ gdzie $p + q = n$

Zauważmy, że dla $z \in A$ zachodzi:

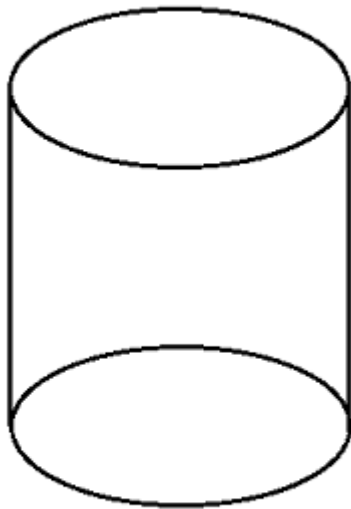
$$\begin{aligned} z \in A &\implies z \in (D^p \times S^q) \vee z \in (S^{p-1} \times D^{q+1}) \\ z \in (D^p \times S^q) &\implies \sum x_i^2 \leq 1 \wedge \sum y_i^2 = 1 \\ z \in (S^{p-1} \times D^{q+1}) &\implies \sum x_i^2 = 1 \wedge \sum y_i^2 \leq 1 \\ z \in A &\implies 1 \leq \|z\| \leq \sqrt{2} \end{aligned}$$

oraz

$$z \in (D^p \times S^q) \wedge z \in (S^{p-1} \times D^{q+1}) \implies z \in (S^{p-1} \times S^q)$$

Stąd widzimy że zbiór A jest sumą dwóch rozmaitości, przecinających się w $S^{p-1} \times S^q$. Jest także prawdą, że zbiór punktów A jest izomorficzny ze zbiorem półprostych o środku w początku układu współrzędnych. Stąd istnieje projekcja punktów ze zbioru A na sferę S^n przeprowadzająca punkty na przecięcia odpowiadających im półprostych ze sferą. Przekształcenie to jest bijekcją i na podobnie jak w dowodzie homeomorfizmu pomiędzy sferą a sześcianem [2] jest homeomorfizmem.

Przykładowo, dla $(p, q) = (1, 1)$ mamy:



Literatura

- [1] prof. dr hab. Stefan Jackowski, *TOPOLOGIA I**, *Pomocnik studenta*,
Notatki do wykładu na Wydziale MIM UW, 30 listopada 2016
- [2] Amidora Idris, *Homeomorphism between Sphere and Cube*, Tahir Ahmad, Normah Maan, Article for Journal of Fundamental Sciences, October 2008