

HELSINGIN YLIOPISTO
MATEMAATTIS-LUONNONTIETEELLINEN TIEDEKUNTA
MATEMATIKAN JA TILASTOTIETEEN LAITOS

Pro gradu -tutkielma

Stone–Čech kompaktisointi

Pekka Keipi

Ohjaaja: Erik Elfving

11. huhtikuuta 2017

Sisältö

1	Johdanto	2
2	Esitietoja	3
3	Uniformiset rakenteet	5
4	Pseudometriikat	9
5	Pseudometriikan määrittämä uniformisuus	11
6	Uniformisoituvat avaruudet	17
7	Hausdorff uniforminen avaruus	19

Luku 1

Johdanto

Luku 2

Esitietoja

Olkoon X joukko ja V ja W karteesisen tulon $X \times X$ osajoukkoja. Merkitään tällöin seuraavasti:

$$V \circ W = \{(x, z) \mid \text{on olemassa sellainen } y \in X, \text{ jolla } (x, y) \in V \text{ ja } (y, z) \in W\},$$

$$W^2 = W \circ W \text{ ja } W^n = W \circ W^{n-1}.$$

Määritelmä 2.1. *Ympäristö.* Olkoon (X, \mathcal{T}) topologinen avaruus ja $x \in X$ alkio. Osajoukko $A \in X$, johon alkio x kuuluu, on alkion x *ympäristö*, jos on olemassa avoin osajoukko $B \subset X$, joka sisältää osajoukon A .

Määritelmä 2.2. Topologisen avaruuden (X, \mathcal{T}) osajoukko $A \subset X$ on avoin, jos se on jokaisen alkionsa $x \in A$ ympäristö.

Määritelmä 2.3. *Ympäristökanta.* Olkoon (X, \mathcal{T}) topologinen avaruus ja $x \in X$ alkio. Kokoelma $B(x)$ alkion x ympäristöjä on alkion x *ympäristökanta* (topologiassa \mathcal{T}), jos jokainen alkion x ympäristö sisältää kokoelman $B(x)$ jonkin jäsenen.

Korollaari 2.4. *Topologisen avaruuden (X, \mathcal{T}) alkion $x \in X$ kaikkien ympäristöjen kokoelma $B(x)$ on alkion x ympäristökanta.*

Esimerkki 2.5. Jos joukkoperhe $B \subset \mathcal{P}(X)$ on avaruuden (X, \mathcal{T}) kanta ja $x \in X$ alkio, niin joukko $B(x) = \{A \mid x \in A \in B\}$ on alkion x eräs ympäristökanta. Käänteisesti, jos jokaisella alkiolla $x \in X$ on annettu ympäristökanta $B(x)$ avaruudessa (X, \mathcal{T}) , niin kokoelma $\bigcup \{B(x) \mid x \in X\}$ on avaruuden (X, \mathcal{T}) kanta.

Lause 2.6. *Olkoon A joukon X peite. Tällöin A on joukon X erään topologian \mathcal{T} esikanta. Lisäksi \mathcal{T} on karkein niistä joukon X topologioista, joilla $A \subset \mathcal{T}$. Tämä topologia \mathcal{T} on peitteen A yksikäsitteisesti määräämä, ja sitä sanotaan peitteen A virittämäksi joukon X topologiaksi.*

Todistus. Topologia II [3] lause 2.19. □

Määritelmä 2.7. *Topologioiden vertailu.* Olkoon X joukko ja \mathcal{T}_1 ja \mathcal{T}_2 topologioita joukolle X . Topologia \mathcal{T}_2 on karkeampi kuin topologia \mathcal{T}_1 , jos jokaisella $U \in \mathcal{T}_2$ pätee $U \in \mathcal{T}_1$, eli $\mathcal{T}_2 \subset \mathcal{T}_1$. Tällöin \mathcal{T}_1 on hienompi kuin \mathcal{T}_2 .

Luku 3

Uniformiset rakenteet

Tässä kappaleessa tutustutaan uniformisiin rakenteisiin ja näiden keskeisiin ominaisuuksiin [1].

Määritelmä 3.1. Uniforminen rakenne (tai uniformisuus) joukolle X annetaan karteesisen tulon $X \times X$ potenssijoukon $\mathcal{P}(X \times X)$ osajoukkona \mathcal{U} , jolle pätee

(U1) Jos $V \in \mathcal{U}$ ja $V \subset W \subset X \times X$ niin $W \in \mathcal{U}$,

(U2) Jokainen äärellinen leikkaus joukon \mathcal{U} alkioista kuuluu joukkoon \mathcal{U} ,

(U3) Joukko $\{(x, x) \mid x \in X\}$ on jokaisen joukon $V \in \mathcal{U}$ osajoukko,

(U4) Jos $V \in \mathcal{U}$, niin $V^{-1} = \{(y, x) \mid (x, y) \in V\} \in \mathcal{U}$,

(U5) Jos $V \in \mathcal{U}$, niin on olemassa sellainen $W \in \mathcal{U}$, jolla $W^2 \subset V$.

Uniformisen rakenteen muodostavia joukkoja $V \in \mathcal{U}$ sanotaan uniformisuuden \mathcal{U} lähistöiksi. Joukkoa X joka on varustettu uniformisuudella \mathcal{U} sanotaan uniformiseksi avaruudeksi.

Huomautus 3.2. Uniformisuuden \mathcal{U} lähistöön (entourage) $V \in \mathcal{U}$ kuuluvan pisteparin $(x, y) \in V$ pisteiden $x, y \in X$ sanotaan olevan V -lähellä, "tarpeeksi lähellä" tai "mielivaltaisen lähellä" toisiaan.

Huomautus 3.3. Mikäli muut ehdot pätevät voidaan ehdot (U4) ja (U5) korvata yhtäpitävällä ehdolla:

(Ua) Jos $V \in \mathcal{U}$, niin on olemassa sellainen $W \in \mathcal{U}$, jolla $W \circ W^{-1} \subset V$.

Huomautus 3.4. Kokoelma $\{\emptyset\}$ on ainoa ehdot täyttävä uniformiteetti tyhjälle joukolle.

Määritelmä 3.5. Olkoon X joukko ja kokoelma $\mathcal{U} \subset X \times X$ uniformiteetti joukolle X . Tällöin lähistöjen joukko $B \subset \mathcal{U}$ on uniformiteetin \mathcal{U} kanta, jos jokaiselle lähistölle $V \in \mathcal{U}$ löytyy kannan alkio $W \in B$, jolla pätee $W \subset V$.

Määritelmä 3.6. Olkoon X joukko. Kokoelma $B \subset \mathcal{P}(X \times X)$ on joukon X erään uniformiteetin kanta, jos kokoelmalle B pätee

(B1) Jos $V_1, V_2 \in B$ niin on olemassa sellainen $V_3 \in B$, jolla $V_3 \subset V_1 \cap V_2$,

(B2) Joukko $\{(x, x) \mid x \in X\}$ on jokaisen joukon $V \in B$ osajoukko,

(B3) Jos $V \in B$, niin on olemassa sellainen $V' \in B$, jolla $V' \subset V^{-1}$,

(B4) Jos $V \in B$, niin on olemassa sellainen $W \in B$, jolla $W^2 \subset V$.

Lause 3.7. *Uniformisen avaruuden topologia. Olkoon joukko X varustettu uniformisuudella \mathcal{U} . Olkoon $x \in X$ alkio ja $V \in \mathcal{U}$ lähistö. Olkoon tällöin*

$$V(x) = \{y \in X \mid (x, y) \in V\} \quad \text{ja} \quad B(x) = \{V(x) \mid V \in \mathcal{U}\}$$

joukkoja. Uniformiteetti \mathcal{U} määrää topologian joukolle X niin, että joukko $V(x)$ on (lähistön V määräämä) ympäristö alkion x ja joukko $B(x)$ on alkion x ympäristökanta kyseisessä topologiassa.

Todistus. Olkoon joukko X varustettu uniformisuudella \mathcal{U} , $x \in X$ alkio ja $V \in \mathcal{U}$ lähistö avaruudessa X . Lisäksi olkoot joukot $V(x)$ ja $B(x)$ kuten edellä. Joukko $V(x)$ on epätyhjä, sillä $x \in V(x)$. Olkoon $W \in \mathcal{U}$ lähistö, jolloin $W(x)$ on alkion x ympäristö. Alkion x ympäristöille $V(x)$ ja $W(x)$ pätee

$$\begin{aligned} V(x) \cap W(x) &= \{y \in X \mid (x, y) \in V \text{ ja } (x, y) \in W\} \\ &= \{y \in X \mid (x, y) \in V \cap W\} \in B(x), \end{aligned}$$

sillä määritelmän 3.1 ehdon (U2) nojalla $V \cap W \in B$. Tällöin joukko $B(x)$ on alkion x kaikkien ympäristöjen joukko ja siten korollarin 2.4 nojalla ympäristökanta. \square

Huomautus 3.8. Uniformiteetin määräämää topologiaa sanotaan uniformiteetin indusoimaksi topologiaksi.

Määritelmä 3.9. Olkoot X ja X' uniformeja avaruuksia ja $f: X \rightarrow X'$ kuvaus. Kuvaus f on *uniformisti jatkuva* (tasaisesti jatkuva), jos jokaiselle avaruuden X' lähistölle V' on olemassa avaruuden X lähistö V niin, että jokaiselle $(x, y) \in V$ pätee $(f(x), f(y)) \in V'$.

Korollari 3.10. *Olkoot X ja X' uniformeja avaruuksia ja $f: X \rightarrow X'$ uniformisti jatkuva kuvaus. Olkoon $g: X \times X \rightarrow X' \times X'$ kuvaus, jolla pätee $g(x, y) = (f(x), f(y))$ kaikilla $x, y \in X$. Tällöin jos V' on avaruuden X' lähistö, niin alkukuva $g^{-1}V'$ on avaruuden X lähistö.*

Todistus. Suora seuraus edellisestä määritelmästä ja uniformisuuden ehdosta (U1). \square

Lause 3.11. *Olkoot X ja X' uniformeja avaruuksia ja $f: X \rightarrow X'$ uniformisti jatkuva kuvaus. Tällöin kuvaus f on jatkuva, kun varustetaan joukot X ja Y uniformiteettiensa indusoimilla topologioilla.*

Todistus. Olkoot X ja X' uniformeja avaruuksia ja $f: X \rightarrow X'$ uniformisti jatkuva kuvaus. Olkoon $g: X \times X \rightarrow X' \times X'$ kuvaus, jolla pätee $g(x, y) = (f(x), f(y))$ kaikilla $x, y \in X$. Olkoon V' avaruuden X' lähistö ja $x' \in X'$ alkio. Avaruuden X' uniformiteetin indusoimassa topologiassa kaava

$$V'(x') = \{y' \in X' \mid (x', y') \in V'\}$$

määrittää alkion x' ympäristön avaruudessa X . Korollarin 3.10 mukaan lähistön V' alkukuva $g^{-1}V'$ on avaruuden X lähistö. Olkoon nyt $x \in X$ sellainen alkio, jolla $f(x) = x'$. Tällöin joukko $g^{-1}V'(x)$ on alkion x ympäristö. Erityisesti ympäristö $g^{-1}V'(x)$ kuvautuu ympäristöön $V'(x')$, sillä ehdosta $(x, y) \in g^{-1}V'$ seuraa $(x', f(y)) \in V'$ kaikilla $y \in X$.

Siis ympäristön alkukuva on ympäristö ja siten uniformisti jatkuva kuvaus on jatkuva. \square

Lause 3.12. *Olkoot X , X' ja X'' uniformeja avaruuksia ja $f: X \rightarrow X'$ ja $g: X' \rightarrow X''$ uniformisti jatkuvia kuvaksia. Tällöin yhdistetty kuvaus $g \circ f: X \rightarrow X''$ on uniformisti jatkuva.*

Todistus. Olkoot X , X' ja X'' uniformeja avaruuksia, $f: X \rightarrow X'$ ja $g: X' \rightarrow X''$ uniformisti jatkuvia kuvaksia ja V'' avaruuden X'' lähistö. Tällöin uniformisti jatkuvan kuvauksen määritelmän nojalla on olemassa avaruuden X' lähistö V' , jolla jokaisella $(x', y') \in V'$ pätee $(g(x'), g(y')) \in V''$. Edelleen lähistölle V' on olemassa avaruuden X lähistö V , jolla jokaisella $(x, y) \in V$ pätee $(f(x), f(y)) \in V'$. Näin ollen lähistölle V'' on olemassa lähistö V , jolla jokaisella $(x, y) \in V$ pätee $(g(f(x)), g(f(y))) \in V''$, eli $((g \circ f)(x), (g \circ f)(y)) \in V''$.

Siis yhdistetty kuvaus $g \circ f: X \rightarrow X''$ on uniformisti jatkuva. \square

Määritelmä 3.13. *Olkoot X ja X' uniformeja avaruuksia ja $f: X \rightarrow X'$ bijektiivinen kuvaus. Kuvaus f on isomorfismi, jos sekä kuvaus f että sen käänteiskuvaus f^{-1} ovat uniformisti jatkuvia.*

Määritelmä 3.14. *Uniformiteettien vertailtavuus.* Olkoon X joukko ja \mathcal{U}_1 ja \mathcal{U}_2 uniformiteetteja joukolle X . Uniformiteetti \mathcal{U}_1 on hienompi kuin uniformiteetti \mathcal{U}_2 , jos identtinen kuvaus $id: (X, \mathcal{U}_1) \rightarrow (X, \mathcal{U}_2)$ on uniformisti jatkuva. Tällöin uniformiteetti \mathcal{U}_2 on karkeampi kuin uniformiteetti \mathcal{U}_1 . Jos lisäksi pätee $\mathcal{U}_1 \neq \mathcal{U}_2$, niin \mathcal{U}_1 on aidosti hienompi kuin \mathcal{U}_2 ja vastaavasti \mathcal{U}_2 on aidosti karkeampi kuin \mathcal{U}_1 . Sanotaan, että kahta uniformiteettia \mathcal{U}_1 ja \mathcal{U}_2 voidaan vertailla, jos \mathcal{U}_1 on hienompi kuin \mathcal{U}_2 . Uniformiteeteille \mathcal{U}_1 ja \mathcal{U}_2 pätee $\mathcal{U}_1 = \mathcal{U}_2$, jos \mathcal{U}_1 on sekä hienompi että karkeampi kuin \mathcal{U}_2 .

Korollaari 3.15. *Olkoon X joukko ja \mathcal{U}_1 ja \mathcal{U}_2 uniformiteetteja joukolle X . Uniformiteetti \mathcal{U}_1 on hienompi kuin uniformiteetti \mathcal{U}_2 jos ja vain jos jokaisella lähistöllä $V \in \mathcal{U}_2$ pätee $V \in \mathcal{U}_1$.*

Korollaari 3.16. *Olkoon X joukko, \mathcal{U}_1 ja \mathcal{U}_2 uniformiteetteja joukolle X ja \mathcal{U}_1 on hienompi kuin \mathcal{U}_2 . Tällöin uniformiteetin \mathcal{U}_1 indusoima topologia on hienompi kuin uniformiteetin \mathcal{U}_2 indusoima topologia.*

Määritelmä 3.17. *Kuvausperheen indusoima uniformiteetti (initial uniformities).* Olkoon X joukko ja Y_i uniformiteetilla varustettuja joukkoja kaikilla $i \in I$, jollain indeksijoukolla I . Olkoon $f_i: X \rightarrow Y_i$ uniformisti jatkuvia kuvauksia kaikilla $i \in I$. Olkoon $g = f_i \times f_i: X \times X \rightarrow Y_i \times Y_i$ kuvaus kaikilla $i \in I$. Olkoon

$$B = \left\{ \bigcap_{i \in I} g^{\leftarrow}(V_i) \mid V_i \in \mathcal{U}_i \right\}$$

missä \mathcal{U}_i on avaruuden Y_i uniformiteetti. Tällöin B on kanta eräälle avaruuden X uniformiteetille \mathcal{U} . Kyseinen uniformiteetti \mathcal{U} on karkein niistä uniformiteeteista, joiden suhteen kaikki kuvaukset f_i ovat uniformisti jatkuvia.

Määritelmä 3.18. *Uniformiteettien pienin yläraja.* Olkoon X joukko ja I jokin indeksijoukko. Olkoon $(\mathcal{U}_i)_{i \in I}$ perhe uniformiteetteja joukolle X . Tällöin perheen $(\mathcal{U}_i)_{i \in I}$ *pienin yläraja* on uniformiteetti \mathcal{U} , joka on kuvausten $id: X \rightarrow (X, \mathcal{U}_i)$ määritelmän 3.17 mukaisesti indusoima.

Luku 4

Pseudometriikat

Tässä kappaleessa tutustutaan pseudometriikoihin, jotka ovat tavanomaisten metriikoiden yleistys. Lisää aiheesta [2].

Määritelmä 4.1. Olkoon X joukko ja $f: X \times X \rightarrow [0, +\infty]$ kuvaus. Kuvaus f on *pseudometriikka*, jos seuraavat ehdot pätevät:

(P1) $f(x, x) = 0$ kaikilla $x \in X$,

(P2) $f(x, y) = f(y, x)$ kaikilla $x, y \in X$,

(P3) $f(x, y) \leq f(x, z) + f(z, y)$ kaikilla $x, y, z \in X$.

Huomautus 4.2. Pseudometriikan määritelmästä saadaan metriikan määritelmä, jos rajoitetaan äärellisiin arvoihin ja vahvistetaan ehtoa (P1) muotoon

(M1) $f(x, y) = 0 \Leftrightarrow x = y$ kaikilla $x, y \in X$.

Metriikan ehdot täyttävä kuvaus on pseudometriikka, joten jokainen metriikka on myös pseudometriikka.

Esimerkki 4.3. Euklidinen etäisyys on pseudometriikka.

Esimerkki 4.4. Olkoon X epätyhjä joukko ja $f: X \times X \rightarrow [0, +\infty]$ sellainen kuvaus, jolla

$$f(x, y) = \begin{cases} 0, & \text{jos } x = y \\ \infty, & \text{muulloin.} \end{cases}$$

Tällöin f on pseudometriikka.

Esimerkki 4.5. Olkoon X epätyhjä joukko ja $g: X \rightarrow \mathbb{R}$ (äärellisarvoinen) kuvaus. Tällöin kuvaus $f: X \times X \rightarrow [0, +\infty]$ kaavalla $f(x, y) = |g(x) - g(y)|$ on pseudometriikka.

Esimerkki 4.6. Olkoon X kaikkien muotoa $g: [0, 1] \rightarrow \mathbb{R}$ olevien jatkuvien kuvausten joukko. Tällöin kuvaus $f: X \times X \rightarrow [0, +\infty]$ kaavalla $f(x, y) = \int_0^1 |x(t) - y(t)| dt$ määrittää pseudometriikan joukolle X .

Huomautus 4.7. Ehdosta (P3) seuraa, että jos $f(x, z) + f(z, y) < \infty$ niin $f(x, y) < \infty$. Tällöin koska kaavat $f(x, z) \leq f(x, y) + f(y, z)$ ja $f(y, z) \leq f(y, x) + f(x, z)$ pätevät, niin myös kaava $|f(x, z) - f(z, y)| \leq f(x, y)$ pätee.

Esimerkki 4.8. Olkoon f pseudometriikka joukolle X ja $\lambda \in \mathbb{R}$ reaaliluku, jolla $\lambda > 0$. Tällöin kuvaus λf , jolla $(\lambda f)(x) = \lambda(f(x))$ kaikilla $x \in X \times X$ on pseudometriikka.

Esimerkki 4.9. Olkoon $(f_i)_{i \in I}$ perhe joukon X pseudometriikoita. Tällöin summakuvaus

$$f: X \times X \rightarrow [0, +\infty], \quad f(x, y) = \sum_{i \in I} f_i(x, y)$$

kaikilla $x, y \in X$ on pseudometriikka.

Esimerkki 4.10. Olkoon $(f_i)_{i \in I}$ perhe joukon X pseudometriikoita. Tällöin kaikilla alkioilla $x, y \in X$ kaavasta

$$f_i(x, y) \leq f_i(x, z) + f_i(z, y)$$

seuraa kaava

$$\sup_{i \in I} f_i(x, y) \leq \sup_{i \in I} (f_i(x, z) + f_i(z, y)).$$

Tällöin kuvaus

$$f: X \times X \rightarrow [0, +\infty], \quad f(x, y) = \sup_{i \in I} f_i(x, y)$$

kaikilla $x, y \in X$ on pseudometriikka.

Luku 5

Pseudometriikan määrittämä uniformisuus

Oletamme koko luvun 5 ajan, että $\mathbb{R}_+ = \{a \in \mathbb{R} \mid a > 0\}$.

Lause 5.1. *Olkoon $a \in \mathbb{R}_+$ reaaliluku ja $U_a \subset \mathbb{R}^n \times \mathbb{R}^n$ joukko kaavalla*

$$U_a = \{(x, y) \mid x, y \in \mathbb{R}^n, |x - y| \leq a\}.$$

Kokoelma $B = \{U_a \mid a \in \mathbb{R}_+\}$ muodostaa joukon \mathbb{R}^n uniformisuuden kannan.

Todistus. Määritelmän 3.6 ehdot pätevät:

- (B1) Olkoon $a_1, a_2 \in \mathbb{R}_+$ reaalilukuja, joilla $a_1 \leq a_2$. Olkoon $x, y \in \mathbb{R}$ ja jos $|x - y| \leq a_1$, niin $|x - y| \leq a_2$. Näin ollen $U_{a_1} \subset U_{a_2}$ ja siis $U_{a_1} \subset U_{a_1} \cap U_{a_2}$,
- (B2) Olkoon $x \in \mathbb{R}^n$. Tällöin kaikilla $a \in \mathbb{R}_+$ pätee $|x - x| = 0 < a$, joten joukko $\{(x, x) \mid x \in X\}$ on jokaisen joukon $U_a \in B$ osajoukko,
- (B3) Olkoon $x', y' \in \mathbb{R}^n$ ja $a \in \mathbb{R}_+$. Tällöin jos $|x' - y'| \leq a$ niin myös $|y' - x'| \leq a$. Näin ollen

$$\begin{aligned} U_a &= \{(x, y) \mid x, y \in \mathbb{R}^n, |x - y| \leq a\} \\ &= \{(y, x) \mid x, y \in \mathbb{R}^n, |x - y| \leq a\} \\ &= U_a^{-1}. \end{aligned}$$

Siis jokaiselle U_a pätee $U_a \subset U_a^{-1}$.

(B4) Olkoon $a \in \mathbb{R}_+$ reaaliluku ja $x, y, z \in \mathbb{R}^n$ sellaisia pisteitä, joilla $|x - z| \leq a$ ja $|z - y| \leq a$, eli $(x, z) \in U_a$ ja $(z, y) \in U_a$. Tällöin kolmioepäyhtälön avulla saadaan

$$|x - y| \stackrel{\Delta\text{-ey}}{\leq} |x - z| + |z - y| \leq a + a = 2a,$$

eli $|x - y| \leq 2a$. Tästä seuraa, että $U_a^2 = U_{2a}$, joten jokaiselle reaaliluvun $b \in \mathbb{R}_+$ määräämälle joukolle U_b löytyy joukko $U_{b/2}$, jolla $U_{b/2}^2 \subset U_b$.

Siis kokoelma $B = \{U_a \mid a \in \mathbb{R}_+\}$ muodostaa joukon \mathbb{R}^n uniformisuuden kannan. \square

Edeltävää lausetta voidaan yleistää seuraavasti:

Lause 5.2. *Olkoon X joukko ja f pseudometriikka joukolle X . Tällöin pseudometriikka f määrittää sellaisen uniformiteetin joukolle X , jonka kannan muodostaa kokoelma $B = \{f^{\leftarrow}[0, a] \subset X \times X \mid a \in \mathbb{R}_+\}$.*

Todistus. Olkoon $a \in \mathbb{R}_+$ reaaliluku ja merkitään joukkoa $f^{\leftarrow}[0, a] \subset X \times X$ kaavalla $f^{\leftarrow}[0, a] = U_a$. Määritelmän 3.6 ehdot pätevät:

(B1) Olkoon $a_1, a_2 \in \mathbb{R}_+$ reaalilukuja, joilla $a_1 \leq a_2$. Tällöin

$$U_{a_1} = f^{\leftarrow}[0, a_1] \subset f^{\leftarrow}[0, a_2] = U_{a_2}$$

ja siis $U_{a_1} \subset U_{a_1} \cap U_{a_2}$,

(B2) Kuvaus f on pseudometriikka, joten pseudometriikan ehdon (P1) nojalla kaikilla $x \in X$ pätee $f(x, x) = 0$. Toisin sanoen jokainen alkio pistepareista (x, x) muodostuvasta joukosta $\{(x, x) \mid x \in X\}$ kuvautuu pseudometriikassa nollassi. Näin ollen joukko $\{(x, x) \mid x \in X\}$ kuuluu sisältyy jokaisen suljetun välin $[0, a]$ alkukuvaan $f^{\leftarrow}[0, a]$ kaikilla $a \in \mathbb{R}_+$.

(B3) Pseudometriikan ehdosta (P2) seuraa, että $f(x, y) = f(y, x)$ kaikilla $x, y \in X$. Tällöin $(x, y) \in U_a \Leftrightarrow (y, x) \in U_a$ ja siis $U_a^{-1} = U_a$, eli jokaiselle U_a pätee $U_a \subset U_a^{-1}$.

(B4) Olkoon $a \in \mathbb{R}_+$ reaaliluku ja $x, y, z \in X$ sellaisia alkioita, joilla $f(x, z) \leq a$ ja $f(z, y) \leq a$, eli $(x, z) \in U_a$ ja $(z, y) \in U_a$. Tällöin pseudometriikan ehdosta (P3) seuraa

$$f(x, y) \leq f(x, z) + f(z, y) \leq a + a = 2a,$$

eli $f(x, y) \leq 2a$. Tästä seuraa, että $U_a^2 = U_{2a}$, joten jokaiselle reaaliluvun $b \in \mathbb{R}_+$ määräämälle joukolle U_b löytyy joukko $U_{b/2}$, jolla $U_{b/2}^2 \subset U_b$.

Siis kokoelma $B = \{U_a \mid a \in \mathbb{R}_+\} = \{f^{\leftarrow}[0, a] \mid a \in \mathbb{R}_+\}$ muodostaa joukon \mathbb{R}^n uniformisuuden kannan ja voimme nyt muodostaa seuraavan määritelmän. \square

Määritelmä 5.3. Olkoon X joukko ja f ja g pseudometriikoita joukolle X . Tällöin lauseen 5.2 nojalla pseudometriikat f ja g määrittävät jotkut uniformiteetit joukolle X . Pseudometriikat f ja g ovat ekvivalentteja, jos ne määrittävät saman uniformiteetin.

Korollari 5.4. Olkoon X joukko ja f ja g pseudometriikoita joukolle X . Määritelmästä 5.3 seuraa, että pseudometriikan f määrittämä uniformiteetti \mathcal{U}_f on karkeampi kuin pseudometriikan g määrittämä uniformiteetti \mathcal{U}_g , jos ja vain jos jokaiselle $a \in \mathbb{R}_+$ on olemassa $b \in \mathbb{R}_+$, jolla $g(x, y) \leq b \Rightarrow f(x, y) \leq a$ kaikilla $x, y \in X$.

Lisäksi, jos kaikilla $x, y \in X$ pätee $f(x, y) \leq b \Rightarrow g(x, y) \leq a$ niin f ja g ovat ekvivalentteja pseudometriikoita.

Todistus. Olkoon X joukko ja f ja g pseudometriikoita joukolle X . Määritelmän 5.2 mukaan pseudometriikan f määrittämän uniformiteetin \mathcal{U}_f kannan muodostaa kokoelma $B_f = \{f^{\leftarrow}[0, a] \subset X \times X \mid a \in \mathbb{R}_+\}$. Tällöin uniformiteetti \mathcal{U}_f on kokoelma

$$\mathcal{U}_f = \{V \subset X \times X \mid f^{\leftarrow}[0, a] \subset V, \text{ jollain } a \in \mathbb{R}_+\}.$$

Vastaavasti uniformiteetin \mathcal{U}_g kannan muodostaa kokoelma $B_g = \{g^{\leftarrow}[0, a] \subset X \times X \mid a \in \mathbb{R}_+\}$ ja uniformiteetti \mathcal{U}_g on kokoelma

$$\mathcal{U}_g = \{V \subset X \times X \mid g^{\leftarrow}[0, a] \subset V, \text{ jollain } a \in \mathbb{R}_+\}.$$

Osoitetaan väitteen implikaatio molempiin suuntiin.

\Rightarrow Olkoon uniformiteetti \mathcal{U}_f karkeampi kuin \mathcal{U}_g ja näin ollen määritelmän 3.14 mukaan identtinen kuvaus $id: (X, \mathcal{U}_g) \rightarrow (X, \mathcal{U}_f)$ on uniformisti jatkuva. Määritelmän 3.9 mukaan tällöin jokaiselle lähistölle $V' \in \mathcal{U}_f$ on olemassa lähistö $V \in \mathcal{U}_g$, jolla pätee jos $(x, y) \in V$, niin $(x, y) \in V'$ kaikilla $x, y \in X$. Tarkastelemalla uniformiteettien kantojen jäseniä saamme edeltävän seuraavaan muotoon: Jokaisella $a \in \mathbb{R}_+$ on olemassa $b \in \mathbb{R}_+$ niin, että kaikilla $x, y \in X$ pätee $(x, y) \in g^{\leftarrow}[0, b] \Rightarrow (x, y) \in f^{\leftarrow}[0, a]$, eli $g(x, y) \leq b \Rightarrow f(x, y) \leq a$.

\Leftarrow Olkoon jokaiselle $a \in \mathbb{R}_+$ on olemassa $b \in \mathbb{R}_+$, jolla $g(x, y) \leq b \Rightarrow f(x, y) \leq a$, eli $(x, y) \in g^{\leftarrow}[0, b] \Rightarrow (x, y) \in f^{\leftarrow}[0, a]$, kaikilla $x, y \in X$. Siis jokaiselle uniformiteetin \mathcal{U}_f kannan jäsenelle $f^{\leftarrow}[0, a']$, $a' \in \mathbb{R}_+$ on olemassa uniformiteetin \mathcal{U}_g kannan jäsen $g^{\leftarrow}[0, b']$, $b' \in \mathbb{R}_+$ niin, että $(x, y) \in g^{\leftarrow}[0, b'] \Rightarrow (x, y) \in f^{\leftarrow}[0, a']$, kaikilla $x, y \in X$. Näin ollen identtinen kuvaus $id: (X, \mathcal{U}_g) \rightarrow (X, \mathcal{U}_f)$ on uniformisti jatkuva ja siten uniformiteetti \mathcal{U}_g on uniformiteettia \mathcal{U}_f hienompi. Siis pseudometriikan f määrittämä uniformiteetti \mathcal{U}_f on karkeampi kuin pseudometriikan g määrittämä uniformiteetti \mathcal{U}_g .

Lisäksi määritelmistä 3.14 ja 5.3 seuraa, että jos \mathcal{U}_f on sekä hienompi että karkeampi kuin \mathcal{U}_g , niin pseudometriikat f ja g ovat ekvivalentteja. \square

Määritelmä 5.5. Olkoon X joukko ja $(f_i)_{i \in I}$ perhe pseudometriikkoja joukolle X . Tällöin pseudometriikkojen f_i määrittämien uniformiteettien \mathcal{U}_{f_i} pienintä ylärajaa sanotaan perheen $(f_i)_{i \in I}$ määrittämäksi uniformiteetiksi.

Määritelmä 5.6. Olkoon X joukko ja $(f_i)_{i \in I}$ ja $(g_j)_{j \in J}$ perheitä pseudometriikoista joukolle X . Perheet (f_i) ja (g_j) ovat ekvivalentteja, jos niiden määrittämät uniformiteetit ovat samoja.

Määritelmä 5.7. Olkoon X joukko ja $(f_i)_{i \in I}$ perhe pseudometriikoita joukolle X . Olkoon $H \subset I$ äärellinen joukko ja $g_H: X \rightarrow [0, \infty]$ kuvaus, jolla $g_H(x) = \sup_{i \in H} f_i(x)$. Nyt

$$\{g_H^{\leftarrow}([0, a]) \subset X \times X \mid H \subset I \text{ äärellinen}, a \in \mathbb{R}, a > 0\}$$

on joukon X erään uniformiteetin kanta. Olkoon $g_{H'}$ pseudometriikka jokaisella äärellisellä potenssijoukon osajoukolla $H' \subset \mathcal{P}(I)$. Nyt

$$\sup_{H \in H'} (g_H) \in (g_H)_{H \subset I}$$

ja $H \subset I$ äärellinen joukko. Tällöin sanotaan, että perhe (g_H) on *saturoitu* (saturated), ekvivalentti perheen $(f_i)_{i \in I}$ kanssa ja saatu saturoimalla perhe $(f_i)_{i \in I}$.

Mikäli indeksijoukko I on äärellinen, niin perheen $(f_i)_{i \in I}$ määräämä uniformiteetti on sama kuin pseudometriikan $g = \sup_{i \in I} f_i$ määräämä.

Määritelmä 5.8. Olkoon uniformiteetit \mathcal{U} ja \mathcal{U}' saturoitujen perheiden $(f_i)_{i \in I}$ ja $(g_j)_{j \in J}$ määräämiä. Uniformiteetti \mathcal{U} on karkeampi kuin uniformiteetti \mathcal{U}' , jos jokaisella $i \in I$ ja $a \in \mathbb{R}$, $a > 0$ löytyy $j \in J$ ja $b \in \mathbb{R}$, $b > 0$, joilla ehdosta $g_j(x, y) \leq b$ seuraa $f_i(x, y) \leq a$.

Lemma 5.9. Olkoon X joukko ja \mathcal{U} uniformiteetti joukolle X . Tällöin on olemassa pseudometriikkaperhe $(f_i)_{i \in I}$, joka määrittää uniformiteetin \mathcal{U} .

Todistus. Jokaiselle $U \in \mathcal{U}$ määritellään perhe (U_n) , jolla $V_1 \subset U$ ja $V_{n+1}^2 \subset V_n$ kaikilla $n \in \mathbb{N}$, $n \geq 1$. Nyt perhe (V_n) on kanta erälle joukon X uniformiteetille \mathcal{U}_V , joka on karkeampi kuin \mathcal{U} . Erityisesti \mathcal{U} on uniformiteettien \mathcal{U}_V , $V \in \mathcal{U}$ pienin yläraja. Tällöin lemma on seuraus seuraavasta lauseesta, sillä (U_n) on uniformiteetin \mathcal{U} numeroituva kanta. \square

Lause 5.10. Olkoon X joukko ja \mathcal{U} uniformiteetti joukolle X . Jos uniformiteetilla \mathcal{U} on numeroituva kanta, niin on olemassa pseudometriikka $f: X \times X \rightarrow \mathbb{R}_+$, jonka määräämä uniformiteetti on identtinen uniformiteetin \mathcal{U} kanssa.

Todistus. Olkoon (V_n) numeroituva kanta uniformiteetille \mathcal{U} . Tällöin olkoon (U_n) perhe symmetrisiä uniformiteetin \mathcal{U} lähistöjä, joilla $U_1 \subset V_1$ ja $U_{n+1}^3 \subset U_n \cap V_n$, kun $n \geq 1$. Nyt (U_n) on myös uniformiteetin \mathcal{U} kanta ja erityisesti $U_{n+1}^3 \subset U_n \cap V_n$, kun $n \geq 1$.

Olkoon $g: X \times X \rightarrow \mathbb{R}_+$ kuvaus, jolla

$$g(x, y) = \begin{cases} 0 & , \text{ jos } (x, y) \in U_n \text{ kaikilla } n \geq 1 \\ 1 & , \text{ jos } (x, y) \notin U_1. \\ 2^{-k} & , \text{ jos } (x, y) \in U_n \text{ kaikilla } n \leq k \text{ ja } (x, y) \notin U_{k+1} \end{cases}$$

Nyt g on symmetrinen, positiivinen ja $g(x, x) = 0$ kaikilla $x \in X$.

Olkoon nyt $f: X \times X \rightarrow \mathbb{R}_+$ kuvaus, jolla

$$f(x, y) = \inf \sum_{i=0}^{p-1} g(z_i, z_{i+1}),$$

missä $p \in \mathbb{N}, p \geq 1$ ja $(z_i)_{0 \leq i \leq p}$ joukon X alkioista muodostuva jono, jossa $z_0 = x$ ja $z_p = y$. Kuvauksen f määrittelystä seuraa, että f on symmetrinen, kolmioepäyhtälö pätee ja kaavat $f(x, y) \geq 0$ ja $f(x, x) = 0$ pätevät kaikilla $x, y \in X$. Siis f on pseudometriikka. Näytetään seuraavaksi, että epäyhtälöt

$$(5.11) \quad \frac{1}{2} g(x, y) \leq f(x, y) \leq g(x, y)$$

pätevät. Kaavan oikea puoli, eli $f(x, y) \leq g(x, y)$ seuraa siitä, että

$$f(x, y) = \inf \sum_{i=0}^{p-1} g(z_i, z_{i+1}) \leq \sum_{i=0}^1 g(z_i, z_{i+1}) = g(z_0, z_1) = g(x, y).$$

Yhtälön vasen puoli osoitetaan induktion avulla. Olkoon $p \in \mathbb{N}$ luku. Nyt jokaisella $p + 1$ alkion jonolla joukon X alkioita $(z_i)_{0 \leq i \leq p}$, jolla $z_0 = x$ ja $z_p = y$, saadaan

$$(5.12) \quad \sum_{i=0}^{p-1} g(z_i, z_{i+1}) \geq \frac{1}{2} g(x, y).$$

Jos $p = 1$, niin summassa on vain yksi termi

$$g(z_0, z_1) = g(x, y) \geq \frac{1}{2} g(x, y).$$

Merkitään

$$a = \sum_{i=0}^{p-1} g(z_i, z_{i+1}).$$

Määrittelyn nojalla $g(x, y) \leq 1$, joten jos $a \geq 1/2$, niin yhtälö 5.12 pätee muodossa $a \geq \frac{1}{2} \geq \frac{1}{2}g(x, y)$. Oletetaan, että $a < 1/2$ ja että h on suurin niistä indekseistä q , joilla $\sum_{i < q} g(z_i, z_{i+1}) \leq a/2$. Tällöin

$$\sum_{i < h} g(z_i, z_{i+1}) \leq a/2 \quad \text{ja} \quad \sum_{i < h+1} g(z_i, z_{i+1}) > a/2,$$

joten $\sum_{i > h} g(z_i, z_{i+1}) \leq a/2$. Induktio-oletuksen nojalla $g(x, z_h) \leq a$, $g(z_{h+1}, y) \leq a$ ja toisaalta myös $g(x, z_h) \leq a$ pätevät. Olkoon $k \in \mathbb{N}$ pienin luku, jolla $2^{-k} \leq a$. Tällöin $k \geq 2$ ja kuvauksen g määrittelystä seuraa, että $(x, z_h) \in U_k$, $(z_h, z_{h+1}) \in U_k$ ja $(z_{h+1}, y) \in U_k$. Nyt $(x, y) \in U_k^3 \subset U_{k-1}$ ja edelleen $g(x, y) \leq 2^{-(k-1)} = 2^{1-k} \leq 2a$, eli $1/2g(x, y) \leq a$. Nyt epäyhtälöt 5.11 on osoitettu päteviksi ja niistä seuraa, että jokaisella $a > 0$ pätee $U_k \subset f^{\leftarrow}([0, a])$, kun $2^{-k} < a$. Toisaalta myös $f^{\leftarrow}([0, a]) \subset U_k$, joten joukot $f^{\leftarrow}([0, a])$ muodostavat kannan uniformiteetille \mathcal{U} . Siis löydettiin pseudometriikka f , joka määrittelee uniformiteetin \mathcal{U} . \square

Luku 6

Uniformisoituvat avaruudet

Tässä luvussa perehdytään uniformisoituihin (uniformizable) avaruuksiin.

Määritelmä 6.1. Olkoon (X, \mathcal{T}) topologinen avaruus ja \mathcal{U} uniformiteetti joukolle X . Uniformiteetti \mathcal{U} on *yhteensopiva* topologian \mathcal{T} kanssa, jos uniformiteetin \mathcal{U} indusoima topologia $\mathcal{T}_{\mathcal{U}}$ on karkeampi kuin topologia \mathcal{T} .

Määritelmä 6.2. Topologinen avaruus (X, \mathcal{T}) on *uniformisoituva*, jos joukolle X voidaan muodostaa topologian \mathcal{T} kanssa yhteensopiva uniformiteetti.

Lause 6.3. Olkoon (X, \mathcal{T}) topologinen avaruus. Avaruuden (X, \mathcal{T}) uniformisoituvuus on yhtäpitävää seuraavan ehdon kanssa:

(Z) Kaikkien alkioiden $x \in X$ kaikilla ympäristöillä $V \in \mathcal{T}$ on olemassa jatkuva reaaliarvoinen kuvaus $f: X \rightarrow [0, 1]$, jolla $f(x) = 0$ ja $f(y) = 1$ kaikilla $y \in X \setminus V$.

Todistus. Näytetään ensin, että ehto on välttämätön. Lauseen 5.9 nojalla uniformiteetille voidaan määrittää pseudometriikkaperhe, joka indusoi kyseisen uniformiteetin. Lisäksi uniformiteetin indusoiman pseudometriikkaperheen voidaan olettaa tuloksen ?? nojalla olevan saturoitu. Tällöin määritelmän 5.2 nojalla on olemassa $a \in \mathbb{R}, a > 0, \alpha \in I$ ja pseudometriikka $f_\alpha \in (f_i)_{i \in I}$, jolla $f_\alpha(x_0, x) \geq a$ kaikilla $x \in X \setminus V_0$ ja $f_\alpha(x_0, x) = 0$. Tämän seurauksena kuvaus $g: X \rightarrow [0, 1]$ kaavalla $g(x) = \inf \left(1, \frac{1}{a} f_\alpha(x_0, x)\right)$ pisteelle x_0 ja ympäristölle V_0 toteuttaa ehdon (Z).

Toisaalta ehto on myös riittävä: Olkoon (X, \mathcal{T}) topologinen avaruus, jolla ehto (Z) pätee. Olkoon $x_0 \in X$ alkio, $V_0 \subset X$ alkion x_0 ympäristö ja $f: X \rightarrow [0, 1]$ ehdon (Z) antama kuvaus alkioille x_0 ja sen ympäristölle V_0 . Tällöin kuvaus $g: X \times X \rightarrow [0, \infty]$ kaavalla $g(x_0, x) = f(x)$ on pseudometriikka. Olkoon \mathcal{U} pseudometriikan g määrittämä uniformiteetti ja $a \in \mathbb{R}_+$ reaaliluku. Tällöin $g^{\leftarrow}[0, a] = \{(x, y) \mid g(x, y) \leq a\}$ on lähistö pseudometriikan g määrittämässä uniformiteetissa \mathcal{U} . Merkitään $g^{\leftarrow}[0, a] = U_a$, jolloin

joukko $U_a(x_0) = \{y \mid g(x_0, y) \leq a\}$ on alkion x_0 ympäristö uniformiteetin \mathcal{U} indusoimassa topologiassa \mathcal{T}' . Joukkojen määrittelyistä seuraa, että jos $a < 1$, niin $U_a(x) \subset V_0$ ja tällöin kokoelma $B = \{U_a(x_0) \mid g(x_0, y) \leq a\}$ on alkion x_0 ympäristökanta topologiassa \mathcal{T} .

Siis avaruus (X, \mathcal{T}) , joka toteuttaa ehdon (Z) on uniformisoituva. □

Luku 7

Hausdorff uniforminen avaruus

Tässä luvussa määritellään Hausdorff uniformiset avaruudet ja esitetään niiden ominaisuuksia, oleellisinpana täydelliseen Hausdorff uniformiseen avaruuteen laajentaminen.

Määritelmä 7.1. Olkoon X joukko ja \mathcal{U} uniformiteetti joukolle X . Uniformiteetti \mathcal{U} on Hausdorff, jos kaikille $x, y \in X, x \neq y$ on olemassa pseudometriikka $f_i \in (f_i)_{i \in I}$, jolla $f_i(x, y) \neq 0$. Erityisesti, jos uniformiteetti \mathcal{U} on Hausdorff ja yhden pseudometriikan f määrittämä, niin $f(x, y) \neq 0$ kaikilla $x, y \in X$.

Uniformiteetti \mathcal{U} ei ole Hausdorff, jos on olemassa sellaiset alkiot $x, y \in X$, joilla $x \neq y$ ja $f_i(x, y) = 0$ kaikilla $i \in I$.

Lemma 7.2. Olkoon X uniforminen avaruus, $A \subset X$ epätyhjä osajoukko ja f pseudometriikka joukolle X . Tällöin pseudometriikan rajoittuma $f|_A: A \times A \rightarrow [0, \infty]$ kaavalla $f|_A(x) = f(x)$ kaikilla $x \in A \times A$ on pseudometriikka joukolle A .

Lemma 7.3. Olkoon X uniforminen avaruus, $A \subset X$ epätyhjä osajoukko ja $(f_i)_{i \in I}$ pseudometriikkaperhe, joka määrää joukon X uniformiteetin. Tällöin joukon X uniformiteetti määrää joukolle A saman uniformiteetin kuin pseudometriikkaperhe $(f_i|_A)_{i \in I}$.

Määritelmä 7.4. Olkoon X uniforminen avaruus. Tällöin on olemassa täydellinen (complete) Hausdorff uniforminen avaruus \hat{X} ja uniformisti jatkuva kuvaus $i: X \rightarrow \hat{X}$, jolle pätee seuraava ominaisuus:

- (P) Olkoon Y täydellinen Hausdorff uniforminen avaruus ja $f: X \rightarrow Y$ uniformisti jatkuva kuvaus. Tällöin on olemassa yksikäsitteinen uniformisti jatkuva $g: \hat{X} \rightarrow Y$, jolla pätee $f = g \circ i$

Olkoon lisäksi X_1 täydellinen Hausdorff uniforminen avaruus ja $i_1: X \rightarrow X_1$ uniformisti jatkuva kuvaus, jolla on ominaisuus (P). Tällöin on olemassa yksikäsitteinen isomorfismi $\varphi: \hat{X} \rightarrow X_1$, jolla pätee $i_1 = \varphi \circ i$.

Korollaari 7.5. *Jos X on Hausdorff uniforminen avaruus, niin "kanoninen kuvaus" $i: X \rightarrow \hat{X}$ määrää isomorfismin $X \rightarrow X'$, jossa X' on tiheä joukossa \hat{X} .*

Kirjallisuutta

- [1] Nicolas Bourbaki: General Topology Part 1, 1. painos, Hermann, 1966.
- [2] Nicolas Bourbaki: General Topology Part 2, 1. painos, Hermann, 1966.
- [3] Jussi Väisälä: Topologia II, 2. korjattu painos, Limes ry, 2005.