

Kuratowskin upotuslause

Pekka Keipi

28. elokuuta 2016

Tiivistelmä

Kuratowskin upotuslause, Pekka Keipi, 013592712

Tämän tutkielman aiheena on Kuratowskin upotuslause, joka on nimetty puolalaisen matemaatikon Kazimierz Kuratowskin mukaan. Kazimierz Kuratowski (2.2.1896 - 18.6.1980) oli puolalainen matemaatikko, joka keskittyi tutkimuksessaan abstraktiin topologiaan ja metrisiin struktuureihin. Tutkielman tavoitteena on esittää ja todistaa Kuratowskin upotuslause. Osa lauseen todistuksesta on harjoitustehtävänä kurssikirjassa Topologia I.

Kuratowskin upotuslauseen todistamiseen tarvitaan esitietoja vektoriavaruuksista ja metrisistä avaruuksista. Vektoriavaruuksien perusominaisuudet, kuten rajoitettujen funktioiden avaruus ja normi, esitetään esimerkkien kera toisessa luvussa. Kuratowskin upotuslauseen todistuksessa hyödynnetty sup-normi esitetään ja todistetaan.

Metristen avaruuksien peruskäsitteitä, kuten joukkojen välinen etäisyys ja normin yhteys metriikkaan, esitetään kolmannessa luvussa. Samassa luvussa esitetään homeomorfismin, upotuksen ja isometrian välisiä suhteita. Kuratowskin upotuslauseen todistuksessa hyödynnetyt rajoitettua metriikkaa koskevat lemmat 3.11 ja 3.12 todistetaan.

Kuratowskin upotuslauseen mukaan jokainen metrinen avaruus voidaan upottaa osaksi normiavaruutta niin, että upotuksen kuvajoukko on suljettu konveksissa verhossaan. Neljännessä luvussa käsitellään konveksin verhon ominaisuuksia aloittaen konveksiuden määrittelystä. Erityisesti konveksin verhon yhteys lineaarikombinaatioihin esitetään ja todistetaan lemmassa 4.6.

Tutkielman viimeisessä luvussa todistetaan Kuratowskin upotuslause. Lauseen todistamiseen tarvitaan esitietoja vektoriavaruuksien ja metrisistä avaruuksien ominaisuuksista. Luvussa todetaan, että upotuksen avulla jokainen metrinen avaruus voidaan kuvata jonkin normiavaruuden osajoukoksi, joka on suljettu konveksissa verhossaan.

Sisältö

1	Johdanto	2
2	Funktion rajoittuma, normi ja sup-normi	3
3	Metrinen avaruus	6
4	Konvekxi verho	10
5	Kuratowskin upotuslause	13

Luku 1

Johdanto

Tämän tutkielman tarkoituksena on todistaa Kuratowskin upotuslause. Lause on nimetty puolalaisen matemaatikon Kazimierz Kuratowskin mukaan. Osa lauseen todistuksesta on tehtävänä kurssikirjassa Topologia I, joka on yksi matematiikan pääaineopiskelijoiden aineopintoja.

Kazimierz Kuratowski (2.2.1896 - 18.6.1980) oli puolalainen matemaatikko, joka keskittyi tutkimuksessaan abstraktiin topologiaan ja metrisiin struktuureihin. Tohtorin tutkinnon hän suoritti vuonna 1921 Varsovan yliopistossa. Toisen maailmansodan aikana hän luennoi Varsovan maanalaisessa yliopistossa. Toisen maailmansodan jälkeen Kuratowski toimi aktiivisesti Puolan tiedeyhteisössä. Hänen merkittävimpiin töihinsä lukeutuvat Kuratowskin sulkeuma-aksioomat sekä Kuratowski-Zornin lemma.

Kuratowskin upotuslauseen todistamiseen tarvitaan esitietoja vektoriavaruuksista ja metrisistä avaruuksista. Tutkielmassa käydään läpi tarvittavat esitiedot ja keskeiset käsitteet kuten sup-normi, metrinen avaruus ja konveksi verho esitellään omissa luvuissaan.

Luku 2

Funktion rajoittuma, normi ja sup-normi

Tässä kappaleessa esitellään vektori- ja normiavaruuksien ja näiden funktioiden perusominaisuuksia. [2]

Määritelmä 2.1. *Vektoriavaruus*

Joukko V on \mathbb{R} -kertoiminen vektoriavaruus, jos kaikkiin $v, w \in V$ ja $a \in \mathbb{R}$ on liitetty yksikäsitteinen summa $v + w \in V$ ja tulo $av \in V$ niin, että seuraavat ominaisuudet ovat voimassa:

- i) $(u + v) + w = u + (v + w)$ kaikilla $u, v, w \in V$.
- ii) $v + w = w + v$ kaikilla $v, w \in V$.
- iii) On olemassa sellainen $0 = 0_v$, että $v + 0 = v$ kaikilla $v \in V$.
- iv) Jokaiseen $v \in V$ liittyy sellainen $-v \in V$, että $v + (-v) = 0$.
- v) $a(v + w) = av + aw$ kaikilla $a \in \mathbb{R}, v, w \in V$.
- vi) $(a + b)v = av + bv$ kaikilla $a, b \in \mathbb{R}, v \in V$.
- vii) $a(bv) = (ab)v$ kaikilla $a, b \in \mathbb{R}, v \in V$.
- viii) $1_v = v$ kaikilla $v \in V$.

Tässä avaruuden V alkioita kutsutaan vektoreiksi ja avaruuden \mathbb{R} alkioita skalaareiksi.

Määritelmä 2.2. *Vektorialiavaruus*

Osajoukko $W \subset V$ on vektoriavaruuden V (vektori)aliavaruus, jos

- i) $v + w \in W$ kaikilla $v, w \in W$,
- ii) $av \in W$ kaikilla $a \in \mathbb{R}, v \in W$ ja
- iii) $0_v \in W$

Määritelmä 2.3. *Rajoitettu funktio*

Olkoon D avaruus ja $F(D, \mathbb{R})$ kaikkien avaruudessa D määriteltyjen reaaliarvoisten funktioiden $f: D \rightarrow \mathbb{R}$ joukko. Joukko $F(D, \mathbb{R})$ on vektoriavaruus [2]. Funktio $f: D \rightarrow \mathbb{R}$ on rajoitettu, jos on olemassa sellainen $M \in \mathbb{R}, M \geq 0$, jolla $|f(x)| \leq M$ kaikilla $x \in D$.

Rajoitettujen funktioiden avaruus $Raj(D, \mathbb{R})$ koostuu kaikista rajoitetuista funktioista $f: D \rightarrow \mathbb{R}$.

Lemma 2.4. *Rajoitettujen funktioiden avaruus $Raj(D, \mathbb{R})$ on reaaliarvoisten funktioiden vektoriavaruuden $F(D, \mathbb{R})$ aliavaruus.*

Todistus. Olkoon $f, g \in Raj(D, \mathbb{R}), M, N \in \mathbb{R}, M, N \geq 0$ niin, että $|f(x)| \leq M$ ja $|g(x)| \leq N$ kaikilla $x \in D$. Tällöin seuraavat kohdat pätevät:

- i) $|f(x) + g(x)| \leq |f(x)| + |g(x)| \leq M + N < \infty$, siis $f + g \in Raj(D, \mathbb{R})$ kaikilla $f, g \in Raj(D, \mathbb{R})$,
- ii) $|af(x)| = |a| \cdot |f(x)| \leq |a| \cdot M < \infty$, siis $af \in Raj(D, \mathbb{R})$ kaikilla $a \in \mathbb{R}, f \in Raj(D, \mathbb{R})$ ja
- iii) $0_{F(D, \mathbb{R})}(x) = 0$ kaikilla $x \in D$, jolloin $0_{F(D, \mathbb{R})} \in Raj(D, \mathbb{R})$.

□

Määritelmä 2.5. *Normi*

Olkoon E vektoriavaruus ja $|\cdot|: E \rightarrow \mathbb{R}_+, x \mapsto |x|$ kuvaus joukossa E . Kuvaus $|\cdot|$ on normi avaruudessa E , jos seuraavat ominaisuudet pätevät kaikilla $x, y \in E, a \in \mathbb{R}$.

- (N1) $|x + y| \leq |x| + |y|$,
- (N2) $|ax| = |a||x|$,
- (N3) Jos $|x| = 0$, niin $x = \bar{0}$.

Vektoriavaruutta, jossa on annettu jokin normi, sanotaan normiavaruudeksi.

Esimerkki 2.6. Määritellään joukossa \mathbb{R}^n tavallinen euklidinen normi $|x| = \sqrt{x_1^2 + \cdots + x_n^2}$.

Määritelmä 2.7. *Sup-normi*

Olkoon D epätyhjä joukko ja $Raj(D, \mathbb{R})$ kaikkien avaruudessa D määriteltyjen rajoitettujen funktioiden $f: D \rightarrow \mathbb{R}$ vektoriavaruus. Yhtälöä $\|f\| = \sup\{|f(x)|: x \in D\}$ sanotaan avaruuden $Raj(D, \mathbb{R})$ sup-normiksi.

Lause 2.8. *Määritelmän 2.7 yhtälö $\|f\| = \sup\{|f(x)|: x \in D\}$ määrittelee normin avaruudessa $Raj(D, \mathbb{R})$.*

Todistus. (N1) Olkoon $f, g \in Raj(D, \mathbb{R})$ ja $x \in D$. Tällöin

$$|f + g|(x) = |f(x) + g(x)| \leq |f(x)| + |g(x)| \leq \|f\| + \|g\|$$

kaikilla $x \in D$, joten $\|f + g\| = \sup\{|f(x) + g(x)|\} \leq \|f\| + \|g\|$.

(N2) Olkoon $f \in Raj(D, \mathbb{R})$ ja $x \in D$. Tällöin

$$|af|(x) = |af(x)| = |a||f(x)| \leq |a|\|f\|$$

kaikilla $x \in D$, joten $\|af\| \leq |a|\|f\|$. Jos $a = 0$, niin (N2) pätee muodossa $0 = 0$. Jos $a \neq 0$, niin $f = a^{-1}af$ ja edellisen yhtälön mukaan $\|f\| \leq |a^{-1}|\|af\|$ ja edelleen $\|af\| \geq |a|\|f\|$ kaikilla $x \in D$. Tällöin siis $\|af\| = |a|\|f\|$.

(N3) Jos $\|f\| = 0$, niin $|f(x)| = 0$ kaikilla $x \in D$, eli $f = \bar{0}$.

□

Esimerkki 2.9. Tapauksessa $D = \mathbb{N}$ saadaan kaikkien rajoitettujen jonojen joukko $raj(\mathbb{N}, \mathbb{R})$. Joukon alkioita ovat rajoitetut jonot $x = (x_1, x_2, \dots)$. Tälle joukolle käytetään usein merkintää l_∞ .

Luku 3

Metriten avaruus

Tässä luvussa esitellään metrinen avaruuksien ominaisuuksia. Metrisiä avaruuksia käsitellään syvemmin kirjassa Topologia I.

Määritelmä 3.1. *Metriten avaruus* on pari (X, d) , jossa X on joukko ja d on *metriikka* joukossa X . Tällöin $d: X \times X \rightarrow \mathbb{R}_+$ on kuvaus, jolle pätee seuraavat ominaisuudet kaikilla $x, y, z \in X$:

$$(M1) \quad d(x, z) \leq d(x, y) + d(y, z)$$

$$(M2) \quad d(x, y) = d(y, x)$$

$$(M3) \quad d(x, y) = 0, \text{ jos ja vain jos } x = y.$$

Esimerkki 3.2. Euklidinen metriikka avaruuden \mathbb{R}^n kahden pisteen $p = (p_1, p_2, \dots, p_n)$ ja $q = (q_1, q_2, \dots, q_n)$ välillä on määritelty

$$d(p, q) = \sqrt{(p_1 - q_1)^2 + (p_2 - q_2)^2 + \dots + (p_n - q_n)^2}.$$

Esimerkki 3.3. Normiavaruus E on aina metriten avaruus, kun metriikaksi valitaan $d(x, y) = |x - y|$ kaikilla $x, y \in E$.

Todistus. Olkoon E normiavaruus. Tällöin kaikilla $x, y \in E$ pätee

$$(M1) \quad d(x, z) = |x - z| = |x - y + y - z| = |(x - y) + (y - z)| \leq |x - y| + |y - z| = d(x, y) + d(y, z),$$

$$(M2) \quad d(x, y) = |x - y| = |y - x| = d(y, x) \text{ ja}$$

$$(M3) \quad d(x, y) = |x - y| = 0, \text{ jos ja vain jos } x = y.$$

□

Määritelmä 3.4. *Joukkojen välinen etäisyys*

Olkoon (X, d) metrinen avaruus ja $A, B \subset X$. Tällöin etäisyys osajoukkojen A ja B välillä on määritelty $d(A, B) = \inf\{d(a, b) : a \in A, b \in B\}$, eli etäisyyksien $d(a, b)$ suurin alaraja, kun $a \in A$ ja $b \in B$.

Tällöin pätee $d(A, B) \geq 0$ ja jos $A = \emptyset$ tai $B = \emptyset$, niin $d(A, B) = 0$.

Lause 3.5. *Olkoon (X, d) metrinen avaruus, $x, y \in X$ ja $A \subset X$ epätyhjä. Tällöin $|d(x, A) - d(y, A)| \leq d(x, y)$. Erityisesti $|d(x, z) - d(y, z)| \leq d(x, y)$ kaikilla $z \in X$.*

Todistus. Olkoon $a \in A$. Tällöin kaikilla $y \in A$ pätee $d(x, A) \leq d(x, a) \leq d(x, y) + d(y, a)$. Ottamalla infimum kaikkien $a \in A$ yli saadaan $d(x, A) \leq d(x, y) + d(y, A)$ ja edelleen $d(x, A) - d(y, A) \leq d(x, y)$. Vastaavasti olkoon $y \in A$, jolloin kaikilla $x \in X$ pätee $d(y, A) - d(x, A) \leq d(y, x) = d(x, y)$. Nyt $d(x, A) - d(y, A) \leq d(x, y)$ ja $d(y, A) - d(x, A) \leq d(x, y)$, jolloin siis $|d(x, A) - d(y, A)| \leq d(x, y)$. □

Määritelmä 3.6. *Homeomorfismi* tarkoittaa kuvausta $f: X \rightarrow Y$, jolla

(H1) f on bijektio,

(H2) f on jatkuva,

(H3) $f^{-1}: Y \rightarrow X$ on jatkuva.

Määritelmä 3.7. *Upotus* tarkoittaa kuvausta $f: X \rightarrow Y$, joka määrittelee homeomorfismin $f_1: X \rightarrow fX$, jolla $f_1(x) = f(x)$ kaikilla $x \in X$.

Määritelmä 3.8. *Isometria* on etäisyydet säilyttävä kuvaus. Olkoon (X, d) ja (X', d') metrisiä avaruuksia. Tällöin kuvaus $h: X \rightarrow X'$ on isometria, jos $d(x_1, x_2) = d'(h(x_1), h(x_2))$ kaikilla $x_1, x_2 \in X$.

Esimerkki 3.9. Peilaus, rotaatio ja siirtokuvaus ovat geometriasta tuttuja isometrioita avaruudessa \mathbb{R}^2 .

Lemma 3.10. *Bijektiivinen isometria on aina homeomorfismi.*

Todistus. Olkoon (X, d) ja (X', d') metrisiä avaruuksia ja olkoon kuvaus $h: X \rightarrow X'$ isometria. Tällöin $d(x_1, x_2) = d'(h(x_1), h(x_2))$ kaikilla $x_1, x_2 \in X$. Tällöin

(H1) h on määritelmän nojalla bijektio,

(H2) Kaikilla $\epsilon > 0$ voidaan valita $\delta = \epsilon$, jolla pätee: Jos $d(x_1, x_2) < \delta$, niin

$$d'(h(x_1), h(x_2)) = d(x_1, x_2) < \delta = \epsilon.$$

Siis h on jatkuva.

(H3) Edellisen kohdan ja isometrisuuden nojalla myös $f^{-1}: Y \rightarrow X$ on jatkuva.

□

Lemma 3.11. *Olkoon (X, d) metrinen avaruus. Tällöin*

$$d': X \times X \rightarrow \mathbb{R}, \quad d'(x, y) = \frac{d(x, y)}{1 + d(x, y)}, \quad x, y \in X$$

on metriikka joukossa X ja joukon X pisteiden d' -etäisyydet toisistaan ovat korkeintaan 1.

Todistus. Olkoon (X, d) metrinen avaruus. Kaikilla $x, y, z \in X$ pätee

$$\begin{aligned} \text{(M1)} \quad d'(x, z) &= \frac{d(x, z)}{1 + d(x, z)} \stackrel{3.13}{\leq} \frac{d(x, y) + d(y, z)}{1 + (d(x, y) + d(y, z))} \\ &= \frac{d(x, y)}{1 + d(x, y) + d(y, z)} + \frac{d(y, z)}{1 + d(x, y) + d(y, z)} \\ &\leq \frac{d(x, y)}{1 + d(x, y)} + \frac{d(y, z)}{1 + d(y, z)} = d'(x, y) + d'(y, z), \end{aligned}$$

$$\text{(M2)} \quad d'(x, y) = \frac{d(x, y)}{1 + d(x, y)} = \frac{d(y, x)}{1 + d(y, x)} = d'(y, x) \text{ ja}$$

$$\text{(M3)} \quad d'(x, y) = \frac{d(x, y)}{1 + d(x, y)} = 0, \text{ jos ja vain jos } d(x, y) = 0, \text{ eli jos ja vain jos } x = y.$$

Joukon X pisteiden d' -etäisyydet toisistaan ovat korkeintaan 1, sillä $d(x, y) \leq 1 + d(x, y)$ kaikilla $x, y \in X$. □

Lemma 3.12. *Olkoon (X, d) metrinen avaruus ja $d'(x, y) = \frac{d(x, y)}{1 + d(x, y)}$ metriikka joukossa X . Tällöin metriikat d ja d' määrittelevät samat kuulaympäristöt avaruudessa X . Toisin sanoen, kaikilla $r > 0$ on olemassa $r' > 0$, jolla $B_d(x, r) = B_{d'}(x, r')$ kaikilla $x \in X$.*

Todistus. Kaikille $r > 0$ voidaan valita $r' = \frac{r}{1+r}$, jolloin

$$\begin{aligned} B_{d'}(x, r') &= \{y \in X : d'(x, y) < r'\} \\ &= \{y \in X : \frac{d(x, y)}{1 + d(x, y)} < \frac{r}{1 + r}\} \\ &\stackrel{3.13}{=} \{y \in X : d(x, y) < r\} \\ &= B_d(x, r). \end{aligned}$$

□

Huomautus 3.13. Lemmoissa 3.11 ja 3.12 hyödynnetään tietoa:

$$a < b \text{ jos ja vain jos } \frac{a}{1+a} < \frac{b}{1+b}.$$

Todistus. Jos $a < b$ niin $\frac{1}{b} < \frac{1}{a}$ ja edelleen

$$\frac{a}{1+a} = \frac{a \cdot 1}{a(\frac{1}{a} + 1)} = \frac{1}{\frac{1}{a} + 1} < \frac{1}{\frac{1}{b} + 1} = \frac{b \cdot 1}{b(\frac{1}{b} + 1)} = \frac{b}{1+b}.$$

Toisaalta jos $\frac{a}{1+a} < \frac{b}{1+b}$ niin $\frac{1}{\frac{1}{a} + 1} = \frac{a \cdot 1}{a(\frac{1}{a} + 1)} = \frac{a}{1+a} < \frac{b}{1+b} = \frac{b \cdot 1}{b(\frac{1}{b} + 1)} = \frac{1}{\frac{1}{b} + 1}$.

Tällöin $\frac{1}{b} < \frac{1}{a}$ ja edelleen $a < b$.

Vastaavasti $a \leq b$ jos, ja vain jos $\frac{a}{a+1} \leq \frac{b}{b+1}$.

□

Luku 4

Konvekksi verho

Tässä luvussa esitellään konveksius, konvekksi verho ja tämän ominaisuuksia. Näitä käsitteitä tarkastellaan syvemmin kirjassa Topologia I.

Määritelmä 4.1. *Konveksius.* Olkoon E normiavaruus, $A \subset E$ ja $a, b \in A$. Yhtälö

$$\alpha(t) = a + t(b - a) = (1 - t)a + tb$$

määrittelee janapolun $\alpha: [0, 1] \rightarrow E$. Kuvajoukko $\alpha[0, 1] = [a, b]$ on jana, jonka päätepisteet ovat $\alpha(0) = a \in A$ ja $\alpha(1) = b \in A$. Joukko $A \subset E$ on konvekksi, jos ja vain jos $[a, b] \subset A$ kaikilla $a, b \in A$.

Esimerkki 4.2. Avaruuden \mathbb{R}^n suljettu yksikkökuula $\bar{B}(0, 1) = \{x \in \mathbb{R}^n: |x| \leq 1\}$ on konvekksi.

Määritelmä 4.3. *Konvekksi verho.* Olkoon E normiavaruus, $A \subset E$ ja $(A_j)_{j \in J} \subset \mathcal{P}(E)$ kaikkien sellaisten konveksien osajoukkojen $A_k \subset E$, $k \in J$ muodostama perhe, joilla $A \subset A_k$. Tällöin joukko $C(A) = \bigcap_{j \in J} A_j$ on joukon A konvekksi verho.

Lemma 4.4. *Konvekksi verho $C(A)$ on konvekksi.*

Todistus. Olkoon $a, b \in C(A) = \bigcap_{j \in J} A_j$. Tällöin $a, b \in A_i$ kaikilla $i \in J$. Jokainen A_i on konvekksi, joten kaikilla $i \in J$ pätee $[a, b] \subset A_i$. Tällöin kaikilla $a, b \in C(A)$ pätee $[a, b] \subset C(A)$, joten konvekksi verho $C(A)$ on konvekksi. \square

Korollari 4.5. *Konvekksi verho $C(A)$ on pienin konvekssi joukko, joka sisältää joukon A .*

Todistus. Olkoon B sellainen konvekssi joukko, jolla $A \subset B \subset C(A)$. Joukko B on konvekssi ja $A \subset B$, joten $B \in (A_j)_{j \in J}$. Tällöin

$$C(A) = \bigcap_{j \in J} A_j \subset B.$$

Siis $B = C(A)$ ja $C(A)$ on pienin konvekssi joukko, jolla $A \subset C(A)$. \square

Lemma 4.6. Olkoon E normiavaruus ja $A \subset E$. Konvekksi verho $C(A)$ on muotoa

$$\sum_{i=0}^n \lambda_i x_i, \quad \text{missä } x_i \in A, \lambda_i \geq 0 \text{ ja } \sum_{i=0}^n \lambda_i = 1$$

olevien lineaarikombinaatioiden muodostama joukko.

Todistus. Konvekksi verho $C(A)$ on konvekksi ja $A \subset C(A)$, joten kaikilla $a, b \in A$ pätee $[a, b] \subset C(A)$, toisin sanoen, $(1-t)a + tb \in C(A)$ kaikilla $0 \leq t \leq 1$, erityisesti

$$c_0 a + c_1 b \in C(A), \quad \text{kun } c_0, c_1 \geq 0 \text{ ja } c_0 + c_1 = 1.$$

Olkoon $x_0, x_1, \dots, x_n, x_{n+1} \in A$, $d_0, d_1, \dots, d_n, e, \lambda_0, \lambda_1, \dots, \lambda_n, \lambda_{n+1} \in \mathbb{R}$ ja $d_i, e, \lambda_i \geq 0$ kaikilla $i \in \mathbb{N}$. Oletetaan, että jollain $k \in \mathbb{N}, k \geq 1$ pätee

$$(4.7) \quad d_0 x_0 + d_1 x_1 + \dots + d_k x_k \in C(A), \quad \text{kun } d_0 + d_1 + \dots + d_k = 1.$$

Olkoon $\lambda_0 + \lambda_1 + \dots + \lambda_k + \lambda_{k+1} = 1$, jolloin $\lambda_0 + \lambda_1 + \dots + \lambda_k = 1 - \lambda_{k+1}$ ja edelleen

$$(4.8) \quad 1 = \frac{\lambda_0 + \lambda_1 + \dots + \lambda_k}{1 - \lambda_{k+1}} = \frac{\lambda_0}{1 - \lambda_{k+1}} + \frac{\lambda_1}{1 - \lambda_{k+1}} + \dots + \frac{\lambda_k}{1 - \lambda_{k+1}}.$$

Tällöin kaavojen 4.7 ja 4.8 nojalla

$$\frac{\lambda_0}{1 - \lambda_{k+1}} x_0 + \frac{\lambda_1}{1 - \lambda_{k+1}} x_1 + \dots + \frac{\lambda_k}{1 - \lambda_{k+1}} x_k \in C(A)$$

ja edelleen konvekksiuden nojalla

$$\begin{aligned} & (1 - \lambda_{k+1}) \left(\frac{\lambda_0}{1 - \lambda_{k+1}} x_0 + \frac{\lambda_1}{1 - \lambda_{k+1}} x_1 + \dots + \frac{\lambda_k}{1 - \lambda_{k+1}} x_k \right) + \lambda_{k+1} x_{k+1} \\ &= \lambda_0 x_0 + \lambda_1 x_1 + \dots + \lambda_k x_k + \lambda_{k+1} x_{k+1} \in C(A). \end{aligned}$$

Siis $C(A)$ sisältää kaikki muotoa

$$\lambda_0 x_0 + \lambda_1 x_1 + \dots + \lambda_n x_n, \quad \text{missä } x_i \in A, \lambda_i \geq 0, \text{ ja } \sum_{i=0}^n \lambda_i = 1$$

olevat lineaarikombinaatiot.

Olkoon B kyseisten lineaarikombinaatioiden joukko ja olkoon $x \in B$ ja $y \in B$. Tällöin on olemassa sellaiset $x_i, y_i \in A, \lambda_i, \lambda'_i \geq 0, \sum_{i=0}^n \lambda_i = 1$ ja $\sum_{i=0}^m \lambda'_i = 1$, joilla

$$x = \lambda_0 x_0 + \lambda_1 x_1 + \dots + \lambda_n x_n \text{ ja } y = \lambda'_0 y_0 + \lambda'_1 y_1 + \dots + \lambda'_m y_m.$$

Tällöin myös mielivaltaisella $0 \leq t \leq 1$ pätee

$$\begin{aligned}(1-t)x + ty &= (1-t)(\lambda_0 x_0 + \cdots + \lambda_n x_n) + t(\lambda'_0 y_0 + \cdots + \lambda'_m y_m) \\ &= (1-t)\lambda_0 x_0 + \cdots + (1-t)\lambda_n x_n + t\lambda'_0 y_0 + \cdots + t\lambda'_m y_m \in B,\end{aligned}$$

sillä

$$\begin{aligned}& (1-t)\lambda_0 + (1-t)\lambda_1 + \cdots + (1-t)\lambda_n + t\lambda'_0 + t\lambda'_1 + \cdots + t\lambda'_m \\ &= (1-t)(\lambda_0 + \lambda_1 + \cdots + \lambda_n) + t(\lambda'_0 + \lambda'_1 + \cdots + \lambda'_m) = (1-t) + t = 1\end{aligned}$$

Siis joukko B on konvekksi. Lisäksi kaikilla $a \in A$ pätee $a = 1 \cdot a \in B$, joten $A \subset B$. Nyt siis joukko B on konvekksi ja $A \subset B$, joten korollaarin 4.5 nojalla $C(A) \subset B$. \square

Luku 5

Kuratowskin upotuslause

Lause 5.1. *Jokaista metristä avaruutta (X, d) kohti on olemassa normiavaruus Z ja upotus $h: X \rightarrow Z$ missä $hX \subset Z$ on suljettu konveksissa verhossa $C(hX)$.*

Todistus. Olkoon (X, d) metrinen avaruus. Tällöin

$$d'(x, y) = \frac{d(x, y)}{1 + d(x, y)}, \quad x, y \in X$$

on lemmän 3.11 mukaan metriikka joukossa X ja joukon X pisteiden d' -etäisyydet toisistaan ovat korkeintaan 1.

Olkoon $Z = \text{Raj}(X, \mathbb{R})$ joukon X kaikkien rajoitettujen reaaliarvoisten funktioiden vektoriavaruus. Tällöin avaruudella Z on määritelmän 2.7 mukaan muotoa

$$\|f_1\| = \sup_{x \in X} |f_1(x)|, \quad f_1 \in Z$$

oleva sup-normi.

Seuraavaksi määritellään homeomorfismi $h: X \rightarrow hX \subset Z$. Tätä varten asetetaan funktio $f_x \in Z$ jokaiselle $x \in X$ yhtälön $f_x(y) = d'(x, y)$ mukaisesti, eli

$$h(x) = f_x, \quad x \in X.$$

Tällöin pätee

$$\|f_{x_1} - f_{x_2}\| = \sup_{x \in X} |d'(x_1, x) - d'(x_2, x)| \geq |d'(x_1, x_2) - d'(x_2, x_2)| = d'(x_1, x_2).$$

Toisaalta mielivaltaiselle $y \in X$ pätee

$$|f_{x_1}(y) - f_{x_2}(y)| = |d'(x_1, y) - d'(x_2, y)| \leq d'(x_1, x_2),$$

jolloin siis

$$\|f_{x_1} - f_{x_2}\| = \sup_{x \in X} |d'(x_1, x) - d'(x_2, x)| \leq d'(x_1, x_2).$$

Edeltävistä epäyhtälöistä saadaan

$$(5.2) \quad \|f_{x_1} - f_{x_2}\| = d'(x_1, x_2), \quad x_1, x_2 \in X,$$

jolloin kuvaus $h: X \rightarrow hX$ on isometria. Funktio h on bijektio, sillä kaikilla $x, x' \in X$, $x \neq x'$ pätee

$$f_x(x) = d'(x, x) = 0 \neq d'(x', x) = f_{x'}(x)$$

ja edelleen

$$h(x) = f_x \neq f_{x'} = h(x').$$

Lemman 3.10 nojalla funktio h on homeomorfismi kuvajoukolle hX .

Seuraavaksi osoitetaan, että hX on suljettu konveksissa verhossa $C(hX)$. Tavoitteena on osoittaa, että avaruuden hX alkioista muodostuvan ja joukossa $C(hX)$ suppenevan jonon raja-arvo kuuluu avaruuteen hX . Olkoon $f \in C(hX)$, $f_{x_i} \in hX$ ja $x_i \in X$ kaikilla $i \in \mathbb{N}$. Oletetaan, että

$$f = \lim_{n \rightarrow \infty} f_{x_n}.$$

Tällöin koska f kuuluu konvekseen verhoon $C(hX)$, niin lemmän 4.6 nojalla f on lineaarikombinaatio vektorialiavaruuden hX vektoreista. Tällöin olkoon $a_0, a_1, \dots, a_k \in X$, $\lambda_0, \lambda_1, \dots, \lambda_k \in \mathbb{R}$ ja $\lambda_i \geq 0$, kaikilla $i \in \mathbb{N}$ niin, että

$$f = \sum_{i=0}^k \lambda_i f_{a_i}, \quad \text{missä} \quad \sum_{i=0}^k \lambda_i = 1.$$

Nyt jollain $i \leq k$ pätee $\lambda_i \geq 1/(k+1)$. Tämä seuraa siitä, että jos $\lambda_i < 1/(k+1)$ kaikilla $i \leq k$, niin

$$\sum_{i=0}^k \lambda_i < \sum_{i=0}^k \frac{1}{k+1} = \frac{k+1}{k+1} = 1,$$

joka on ristiriidassa oletuksen $\sum_{i=0}^k \lambda_i = 1$ kanssa. Voidaan siis valita sellaiset a_0, a_1, \dots, a_k , $\lambda_0, \lambda_1, \dots, \lambda_k$, että

$$\lambda_0 \geq \frac{1}{k+1} \text{ ja } f = \sum_{i=0}^k \lambda_i f_{a_i}, \quad \text{missä} \quad \sum_{i=0}^k \lambda_i = 1.$$

Tällöin

$$\|f - f_{x_n}\| \geq |f(x_n) - f_{x_n}(x_n)| = |f(x_n) - d'(x_n, x_n)| = |f(x_n)|$$

ja edelleen

$$|f(x_n)| = \sum_{i=0}^k \lambda_i f_{a_i}(x_n) \geq \lambda_0 f_{a_0}(x_n) \geq \frac{1}{k+1} d(a_0, x_n).$$

Tällöin yhtälöstä $\lim_{n \rightarrow \infty} f_{x_n} = f$ seuraa, että $\lim_{n \rightarrow \infty} x_n = a_0$. Tällöin yhtälön 5.2 nojalla $\|f_{x_n} - f_{a_0}\| = d'(x_n, a_0) \rightarrow 0$, kun $n \rightarrow \infty$. Siis $f = \lim_{n \rightarrow \infty} f_{x_n} = f_{a_0} \in hX$, joten $hX \subset C(hX)$ on suljettu.

□

Kirjallisuutta

- [1] Karol Borsuk: Theory of retracts, Państwowe Wydawn. Naukowe, 1967.
- [2] Jussi Väisälä: Topologia I, 4. korjattu painos, Limes ry, 2007.