

# ITSEORGANISOITUVAT KARTAT INTONAATIOITUTKIMUKSEN APUVÄLINEENÄ

**Stefan Werner**

Kieliteknologia, Vieraiden kielten laitos, Joensuun yliopisto  
stefan.werner@joensuu.fi

*Itseorganisoituva kartta on nykyaikainen menetelmä, joka soveltuu erityisesti eksploratiivisiin tutkimuksiin monen numeerisen muuttujan asetelmissa. Puheentutkimuksessa itseorganisoituvaa karttaa voidaan käyttää esimerkiksi intonaation akustisten parametrien tutkimiseen.*

**Avainsanat:** SOM, FO, intonaatio

## 1. JOHDANTO

Tässä artikkelissa on tarkoitus esitellä lingvistiksessä puheentutkimuksessa vielä vähän käytettyjä menetelmiä, joita sovelletaan laajasti muiden alojen empiirisissä tutkimuksissa.

Keinotekoisten hermoverkkojen ideaan perustuvia analyysi-, luokittelu-, synteesi- ja mallintamismenetelmiä on nykyisin tarjolla laaja valikoima. Samaan aikaan myös lingvistiksessä ja foneettisessa tutkimuksessa on totuttu lisääntyvään kvantitatiivisten menetelmien ja tietokonepohjaisten työvälineiden käyttöön, mutta toistaiseksi vain harvoin turvaututaan tähän uusien metodien luokkaan, johon itseorganisoituvat kartatkin lukeutuvat. Artikkelin tavoitteena on tutustuttaa tilastollisten menetelmien rajoja kohdanneet puheen- tai kielentutkijat metodiin, jota he voivat hyödyntää analysoidessaan empiiristä aineistoa.

## 2. ITSEORGANISOITUVA KARTTA

### 2.1. Teoria

Itseorganisoituvien karttojen (self-organizing maps/SOM) tarkoitus on löytää rakenteita kompleksisesta empiirisestä aineistosta. Jos aineistossa on monta muuttujaa, perinteiset tilastolliset analyysit eivät useimmiten pysty selvittämään, mitkä havainnot ovat samankaltaisia ja voisivat kuulua yhteiseen luokkaan. Itseorganisoituvassa kartassa sen sijaan aineiston monet ulottuvuudet projisoidaan litteälle pinnalle niin, että eri havaintojen samankaltaisuudet ja erilaisuudet näkyvät etäisyyksinä kartan pisteiden välillä. Menetelmän kehittäjän Kohosen (1989: 148) mukaan:

”[...] the self-organized mapping does directly what would be hard for clustering methods, namely, to display the overall similarity relations in a metric way, two-dimensionally. For this reason the self-or-

ganized mappings might be used to visualize topologies and hierarchical structures of high-dimensional pattern spaces.”

Kohosen (1996: 4) käyttämä analogia selventänee itseorganisoituvan kartan perusajatuksen: tietojen rakenne pyritään säilyttämään samantapaisesti kuin kukka voidaan kuivattaa puristimessa niin, että se näyttää kaksiulotteiselta kuvalta itsestään. Kolmiulotteisen kukan muodon ja rakenteen pysymme tosin tajuamaan myös ulottuvuuksia redusoimatta, mutta neljästä ulottuvuudesta lähtien ihminen tarvitsee hahmottamiseen apuvälineitä, joista yksi hyvin joustava on SOM.

Itseorganisoituva kartta, joka kuuluu neuraaliverkkojen perheeseen, oppii ohjaamattomasti kuvaamaan empiirisen havaintoaineiston karttayksiköiden hilana, jossa jokaiseen yksikköön kuuluu tietty parametrivektori sekä etäisyysmitta hilanaapureihin; samaa etäisyysmittaa käytetään myös aineiston ja karttayksiköiden parametrivektoreita vertaillaessa, joten kaikki havainnot voidaan liittää parhaiten sopivaan eli lähimpään yksikköön. Hilalla voi olla joko suorakulmainen (kuvio 1) tai heksagonaalinen topologia, millä voidaan vaikuttaa eri rakenteiden visuaaliseen esitystapaan. Muista hermoverkko menetelmistä itseorganisoituvan kartan erottaa ratkaisevasti itsenäinen oppiminen: sitä ei

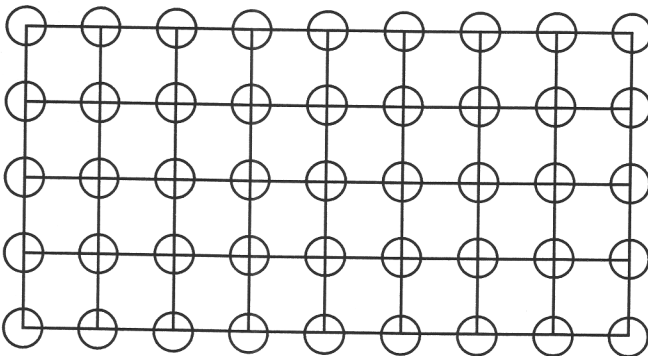
tarvitse opettaa valmiiden oikeiden tulosten avulla, vaan karttaverkko löytää itse vastauksia. Toisin kuin perinteisessä tilastollisessa ryväsanalyysissä SOM-analyysissä ei edellytetä tietoa tai arvauksia siitä, montako eri ryvästä tai luokkaa aineistosta on löydettävissä, vaan ohjaamaton oppiminen johtaa sellaiseen rakenteen esittämiseen, josta tutkija voi nähdä, mitkä havainnot kuuluvat yhteen, mitkä eivät (ks. yksinkertaistettu esimerkki kuvassa 2). Tämä päättely on hyvin perusteltu siksi, että itseorganisoituvat kartat tuottavat myös luokitteluun tarpeelliset etäisyyden ja tiheyden mitat.

Itseorganisoituvia karttoja voidaan käyttää sekä eksploraatiiviseen parametriavaruuden visualisointiin että suoraan ryväsanalyysin. Niiden teorian ja toiminnan tarkka formaalinen kuvaus löytyy esim. teoksesta Kohonen (2001).

## 2.2. Sovellukset

Viime vuosikymmenten aikana SOM-menetelmää on käytetty mitä erilaisimpiin käyttötarkoituksiin ja sovelluksiin. Tässä muutama esimerkki:

- kasvojen tunnistus (Tolba & Abu-Rezq, 1999),
- kulutustottumusten analyysi (Cottrell et al., 1997),



KUVA 1. Kaksiulotteinen karttahila yksiköineen (ympyrät).

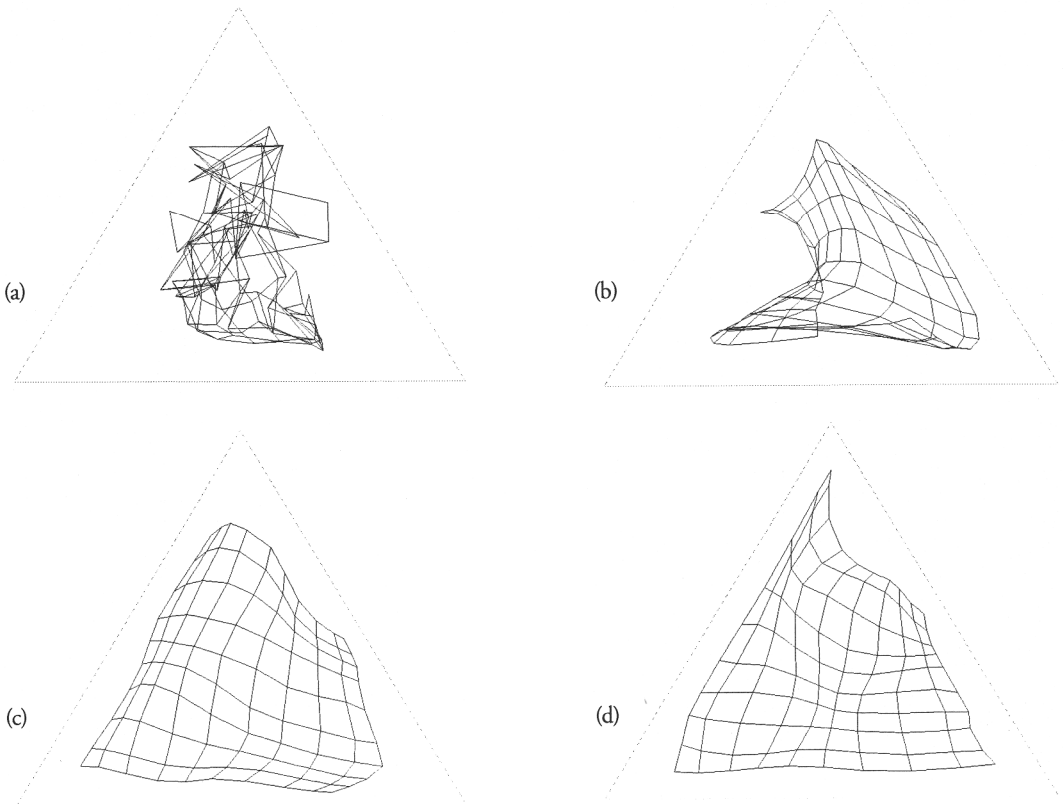
- robotin kävelytyylin arviointi (Xuemin et al., 1997),
- kasvien siementen luokittelu (Goodacre et al., 1996),
- terveiden ja patologisten äänten erottelu (Callan et al., 1999),
- dysleksian tutkimus (Miikkulainen, 1997).

### 3. ITSEORGANISOITUVAT KARTAT PUHEEN- JA KIELENTUTKIMUKSESSA

#### 3.1 ”Perinteisiä” sovelluksia

Itseorganisoituvien karttojen ensimmäinen laajasti huomiota herättänyt sovellus tapahtui juuri puheentutkimuksessa. Vuonna

1987 Kohosen ryhmä julkaisi ”foneemisen kirjoituskoneen” kuvauksen (Kohonen et al., 1987); tutkijat olivat onnistuneet luokittelemaan akustisia parametrivektoreita (jotka sisälsivät lähinnä tietoja spektristä) äännetyypeiksi. Tämän jälkeen on jatkuvasti ilmestynyt uusia puheen- tai kielentutkimukseen liittyviä tutkimuksia, pääasiallisesti kieliteknologian (esim. Honkela et al., 1995; Lagus, 2000) ja puheen- sekä puhujantunnistuksen (esim. Mujunen et al., 1993; Ramesh et al., 1991; Chen et al., 1996; Anderson, 1994; Anderson & Patterson, 1994) aloilla. Valtaosa näistä julkaisuista on kuitenkin syntynyt insinööritieteissä eikä fonetiikassa tai kielitieteessä (ks. laaja viitekokoelma osoitteessa <http://www.cis.hut.fi/research/som-bibl/>).



KUVA 2. Itseorganisoituva kartta, jolle syötetään ympäröivän kolmion reunapisteiden koordinaatteja eri vaiheissa oppimisprosessia. Yhden opetuskierroksen aikana syötetään kerran kaikkien pisteiden kaikki parametrit (eli tässä koordinaatit). (a) 10 opetuskierroksen jälkeen (b) 100 opetuskierroksen jälkeen (c) 1000 opetuskierroksen jälkeen (d) 5000 opetuskierroksen jälkeen

### 3.2. UUSI SOVELLUSESIMERKKI: INTONAATIOMALLIT

Eri intonaatioteoriat, -mallit, ja -kuvaukset käyttävät kirjavaa joukkoa akustisia ja lingvistisiä kriteereitä sävelkulkuihmien luokitteluun. Empiirisiä tutkimuksia kaikkien näiden kriteereiden vaikutuksista ja keskinäisistä suhteista ei ole paljonkaan tehty, vaikka juuri tällainen selvitys vasta mahdollistaisi eri lähestymistapojen systemaattisia vertailuja. Näin on useimmiten tyydytty yksittäisten esimerkkien kritiikkiin tai taustalla olevan teorian yleiseen arviointiin ja vältetty perusteellisia aineistopohjaisia kontrastiivisia analyysyjä vedoten mallien keskinäiseen yhteensopimattomuuteen.

Esimerkiksi IPO-koulukunnan prototyypisiä F0-kontuureja (t Hart et al., 1990) ei suoraan voi verrata ToBI:n (Silverman et al., 1992) kaltaisiin toonipisteisiin tai Fujisakin (1997) fraasi- ja aksenttikomentoihin, koska relevanttien F0-vaihtelujen representaatiot näissä kolmessa ääriytyypissä ovat liian erilaisia. Seuraavassa hahmottelen, miten itseorganisoituvat kartat voivat toimia tutkimuksen apuvälineenä, joka sittenkin mahdollistaa tällaiset vertailut.

Ensimmäinen askel on yhteisen representaation löytäminen kaikkien mallien kategorioille. Koska nämä kategoriat on määritelty suhteessa akustisiin ilmiöihin, joskaan ei yhteismitallisin suurein, niiden kuvaamisen pitäisi onnistua sopivan laajalla akustisten parametrien joukolla. Vaikka tietty malli ei käytäkään kuin pientä osajoukkoa, johon ei välttämättä edes kuulu yhtään jonkin toisen mallin käyttämää parametria, malleja voidaan kuitenkin vertailla toisiinsa sellaisten havaintojen kautta, joille on tiedossa kaikkien parametrien arvot.

Mutta mikä on akustisten mittausten kohde? F0-käyrä pitää eritellä joiksikin diskreetiksi yksiköiksi, jotka ovat tarpeeksi pieniä

toimiakseen minkä tahansa F0-representaation rakennuspalikkoina. Yksi tämän ehdon täyttävä yksikkö on kahden vierekkäisen F0-käännekohdan pari. F0-käyrän suoristaminen siinä määrin, että mikroprosodiset vaihtelut (segmentaaliset vaikutukset F0:aan) häviävät, säilyttää kuulohavainnon samanlaisena eli ei muuta intonatorista funktiota. Lisäksi kahden käännekohdan välisistä suorista viivoista voi rakentaa IPO-kontuureja yhtä hyvin kuin ToBI-pisteitä yhdistäviä suoria tai jopa perseptuaalisesti ekvivalentteja likimääräistyksiä Fujisakin F0-jatkumoista.

Kuvassa 3 nähdään, miten joitakin esimerkkiparametreja mitataan F0-käännekohtapareiksi eritellystä käyrästä. Seuraavassa selitän kuvan merkinnät:

**Suora 1–4:** F0-käännekohtien väliset

lineaariset approksimaatiot

**F0K:** F0-suoran kesto

**F0a, F0l:**  $F_0$ -arvot suoran alussa ja lopussa

**F0ero:** F0l – F0a

**voi:** ”vowel onset interval”: aikaväli vokaalin alusta seuraavan vokaalin alkuun

**vK:** vokaalin kesto

**tK:** tavun kesto

**sK:** sanan kesto

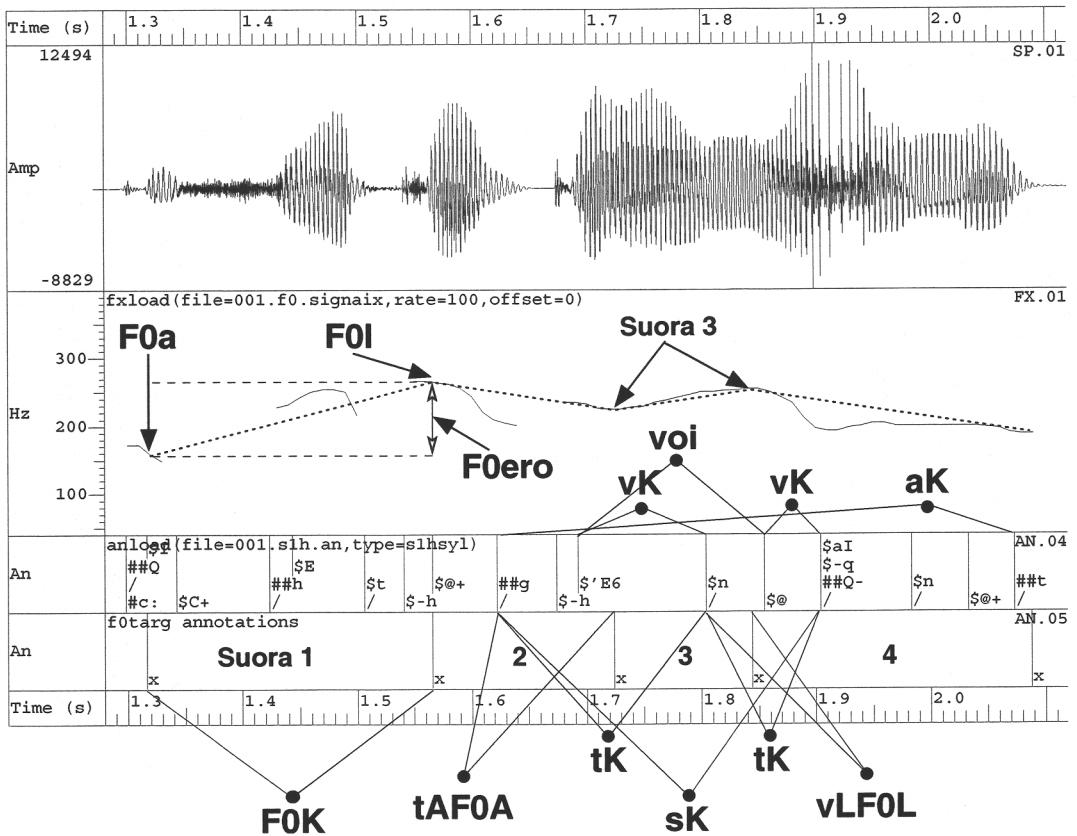
**aK:** ”aksenttiryhmän” kesto: aikaväli (lause)painollisen tavun alusta seuraavan painollisen tavun alkuun

**tAFOA:** aikaväli tavun alusta F0-suoran alkuun

**vLFOL:** aikaväli vokaalin lopusta F0-suoran loppuun.

Parametrin representaation tarkoitus on siis sisältää vähintään kaikki eri malleissa sovelletut akustiset muuttujat sekä lisäksi kaikki muutkin mitattavat suureet, joilla mahdollisesti on vaikutus intonaatioon. SOM-menetelmän yksi etu on, että tutkijan ei tarvitse jättää huomion ulkopuolelle potentiaalisia tekijöitä esimerkiksi rajallisten

file=001.sfs speaker=rtd token=001



KUVA 3. F0-käyrän erittely käännekohtapareiksi ja esimerkkejä akustisten parametrien mittauksesta.

laskentaresurssien takia, vaan karsiminen voi odottaa, kunnes sitä puoltavaa empiiristä näyttöä on saatu.

Toinen askel on mallikategorioiden koodaus sopivilla akustisilla parametreilla; mitä laajempaa muuttujaosajoukkoa tähän sovelletaan, sitä tarkempaan vertailutyöhön itseorganisoituvaa kartta myöhemmin pystyy. Seuraavaksi mitataan ja tallennetaan empiirisen F0-aineiston kaikki aikaisemmin valitut akustiset parametrit. Juuri tämän aineiston kautta vertailu saadaan aikaan: kartassa F0-havainnot ryhmittyvät rypäiksi ja nämä rypäiden sijainnit voidaan suhteuttaa mallikategorioiden sijoituspaikkoihin.

Neljäs ja viimeinen askel on siis itseorganisoituvan kartan 'opetus' empiirisellä aineistolla ja mallikategorioiden asettaminen sa-

maan karttaan. Silmämääräisesti voi sitten tarkastella aineiston sisäisen rakenteen suhdetta eri mallien saman parametriavaruuden jaotteluun sekä verrata suoraan mallikategorioiden jakaumia keskenään.

Havainnollistavana esimerkkinä voin käyttää kolmen saksan kielen intonaatiomallin vertailua (Werner, 2000). Fujisaki-, ToBI- ja IPO-mallin sovelluksista saksan kieleen tutkittiin seuraavia malleja: Möbius (1993), Benz Müller & Grice (1997) ja Adriaens (1991). Parametrien koodaus oli IPO- ja ToBI-mallin kohdalla triviaalia, ja myös Fujisaki-säännöstö (Möbius, 1993, 167–170) saatiin muunnettua F0- ja aikaparametreiksi generoimalla säännöstön perusteella prototyyppi-käyriä mittauskohteiksi. Empiiriset parametriarvot saatiin analysoimalla

PHONDAT-korpusta (Kohler, 1994).

Kuvassa 4 on esitetty kolmen akustisen parametrin 'komponenttitasot' eli yhden erillisen muuttujan arvojen projisoinnit karttaan. Lopullinen kartta yhdistää kaikki komponenttitasot (tässä tapauksessa 32) yhdeksi kaksiulotteiseksi koordinaatistiksi. Komponenttitasoja voidaan pitää eräänlaisena parametrin tilastollisen jakauman visualisointina.

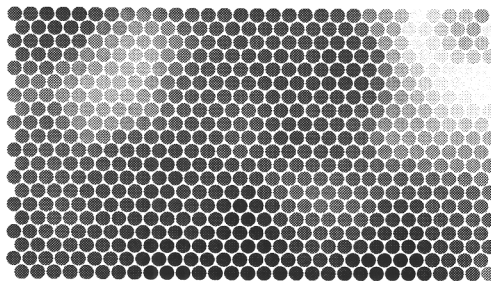
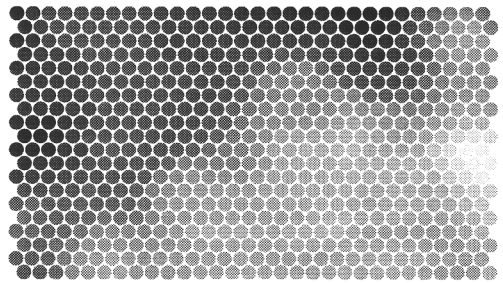
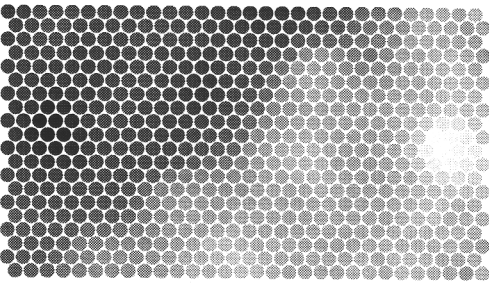
Jotta havaintojen sijoittumispaikka ja etäisyys naapureihin saataisiin näkymään samassa kuvassa, käytetään kokonaiskartan esittämiseksi erilaisia graafisia havainnollistamismenetelmiä, jotka hyödyntävät perspektiiviä tai värejä kolmannen ulottuvuuden esittämiseksi. Useimmiten valitaan joko U-matriisi (Ultsch, 1993), kuten kuvassa 5, tai Sammonin kuvaus (Sammon Jr., 1969), kuten kuvassa 6. Näissä esimerkeissä Möbiuksen Fujisaki-kategorioiden numerot on sijoitettu  $12 \times 8$  -kokoiseen karttaan.

Kaikki havainnot voidaan paikallistaa tarkempaa tutkimista varten, mutta jo ensisil-

mäyksellä voi huomata mm. seuraavat seikat:

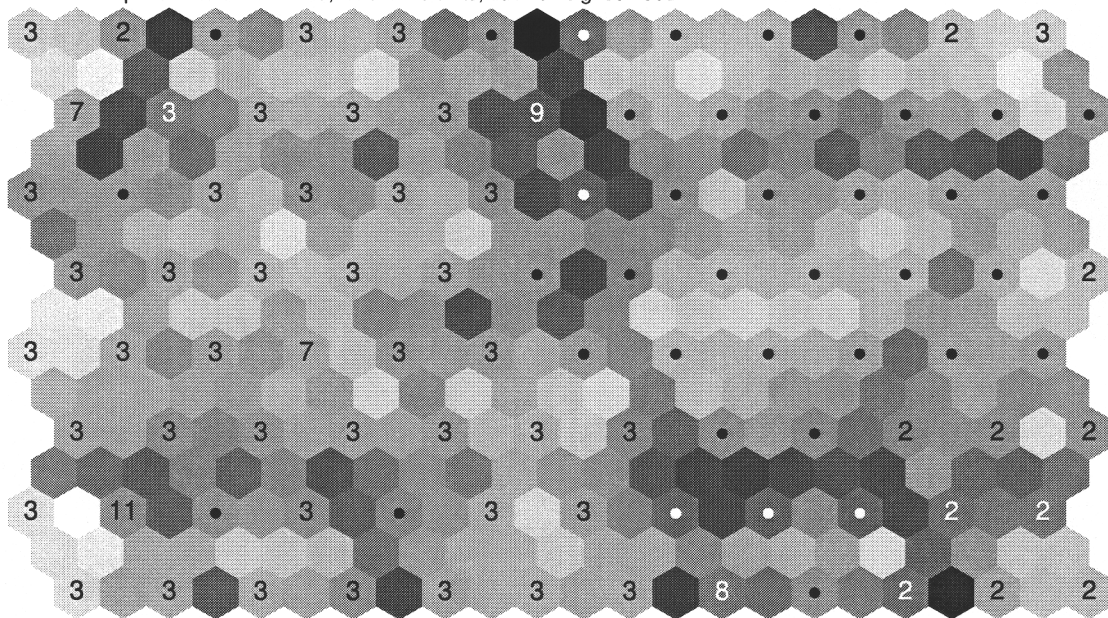
- kategoria 3 on levinnyt hyvin laajalle, se ei ilmeisesti pysty kovin tarkkaan rajaamaan tai määrittelemään aineiston havaintoja
- kategoria 2 on huomattavasti selvemmin hahmotettava omaksi ryhmäksi (vaikka kaksi hajahavaintoakin löytyy)
- muut kategoriat joko puuttuvat kokonaan tai esiintyvät erittäin harvoin, joten voidaan kysyä esimerkiksi, onko määritelmässä puutteita tai onko korpus liian pieni tai ei riittävän edustava.

Kun samoihin karttoihin sijoittaa vielä muidenkin mallien kategoriat, pystyy helposti muodostamaan hypoteeseja kunkin mallin heikkouksista ja vahvuuksista sekä mallien välisistä suhteista. Tällaiset visualisoinnin avulla syntyneet hypoteesit on sitten helppo tilastollisesti tarkastaa karttakoordinaattien ja numeeristen etäisyysmittojen analyysillä.

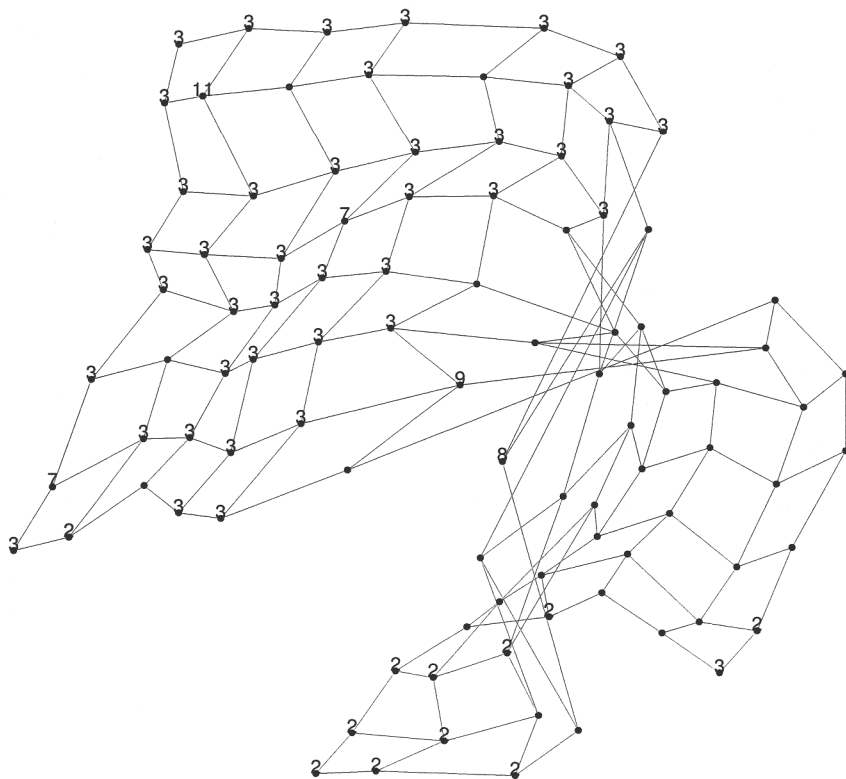


KUVA 4. Kolmen parametrin komponenttitasot ( $30 \times 20$  karttayksikköä). F0-suoran jyrkkyyden ja loppufrekvenssin (kuviot a ja b) tiheysjakaumat muistuttavat toisiaan, mutta tAF0A-parametrin (ajallinen etäisyys tavun alusta F0-suoran loppuun, kuvio c) useimmiten esiintyvät arvot sijoittuvat kartassa muualle. (a) jyrkkyyden (b) F0l (c) tAF0A

rd4-12-8.map.moebius-all - Dim: 29, Size: 12\*8 units, bubble neighborhood



KUVA 5. U-matriisi Möbius-mallin kategoriosta puhekorpuksen kartassa. Pisteet ja luvut edustavat karttayksiköitä, harmaasävyt etäisyyksiä (mitä vaaleampi, sitä suurempi välimatka).



KUVA 6. Sammonin kuvaus Möbius-mallin kategoriosta puhekorpuksen kartassa. Karttayksiköiden sijoittaminen kolmiulotteiseen tilaan edustaa niiden välisiä etäisyyksiä (vrt. kuva 1).

Itseorganisoituvien karttojen tärkeä anti tässä esimerkissä on ensinnäkin tämä ainutlaatuinen kaikkia parametreja yhdistävä ja toisiinsa suhtautuva analyttinen esitystapa, joka ratkaisevasti edesauttaa eksploratiivisia tutkimuksia. Toiseksi, nimettyjen havaintojen (tässä mallikategorioiden edustajien) sijoittaminen empiirisen aineiston perusteella luotuun karttaan mahdollistaa ei-yhteismittallisten representaatioiden suoran vertailun.

#### 4. LOPUKSI

Itseorganisoituvat kartat ovat varteenotettava menetelmävalinta esimerkin kaltaisissa tapauksissa. Kuten mitä tahansa menetelmää, niitä ei kuitenkaan pidä soveltaa varauksettomasti ja ilman tarkkaa harkintaa. Esimerkiksi kategoriamuuttujien uudelleenkodeaus numeeriseksi, jotta niiden arvot sopisivat kartan opetussyötteiksi, on vain harvoin perusteltavissa eikä todennäköisesti tuota tuloksia, joita ei olisi saatu helpommin perinteisellä tilastomenetelmällä. On myös otettava huomioon, että SOM-menetelmien soveltuvuus tiettyjen tietorakenteiden pelkkään visualisointiin ei takaa yhtä hyvää samojen tietojen luokittelukykyä ja päinvastoin (ks. Flexer, 1999).

Lopuksi annetakoon metodologiasta kiinnostuneille muutama käytännön vihje niitä monia tilanteita varten, joissa itseorganisoituvista kartoista voi olla hyötyä. Edellä mainitun Kohosen teoksen (2001) lisäksi tai rinnalle kelpaavat tiedonlähteinä mm. seuraavat verkkodokumentit, jotka osittain sisältävät myös interaktiivisia harjoitus esimerkejä:

- <http://www.cis.hut.fi/research/som-research/som.shtml>
- <http://www.cis.hut.fi/research/javasomdemo/>

- <http://www.cis.hut.fi/~jhimberg/dippa/node5.html>
- <http://davis.wpi.edu/~matt/courses/soms/#Introduction>

Teknillisen Korkeakoulun informaatiotekniikan laboratorion sivuilta löytyy ohjelmistopaketti SOM\_PAK, jolla karttojen alustus, opetus ja visualisointi voidaan suorittaa omassa tietokoneessa. Myös vapaasti saatavat neuraalilaskennan yleisohjelmistot tarjoavat – joskin aloittelevalle humanistille mahdollisesti turhan monimutkaisia – SOM-moduuleja. Linkit ovat

- [http://www.cis.hut.fi/research/som\\_lvq\\_pak.shtml](http://www.cis.hut.fi/research/som_lvq_pak.shtml)
- <http://www-ra.informatik.uni-tuebingen.de/SNNS/>
- <http://www.cnbc.cmu.edu/PDP++/PDP++.html>

#### VIITTEET

- Adriaens, L. M. H. (1991). *Ein Modell deutscher Intonation*. Väitöskirja, Technical University Eindhoven.
- Anderson, T. (1994). Auditory models with Kohonen SOFM and LVQ for speaker independent phoneme recognition. Teoksessa *Proc. ICNN'94, International Conference on Neural Networks*, (s. 4466–4469). Piscataway, NJ: IEEE Service Center.
- Anderson, T. R. & Patterson, R. D. (1994). Speaker recognition with the auditory image model and self-organizing feature maps: A comparison with traditional techniques. Teoksessa *ESCA Workshop on Automatic Speaker Recognition Identification and Verification*, (s. 153–156). Armstrong Lab., Wright Res. & Dev. Center, Wright-Patterson AFB, OH, USA, Martigny, Switzerland: IDIAP.
- Benzmüller, R. & Grice, M. (1997). Trainingsmaterialien zur Etikettierung deutscher Intonation mit GToBI. *Phonus*, 3, 9–34.



- Callan, D. E., Kent, R. D., Roy, N. & Tasko, S. M. (1999). Self-organizing map for the classification of normal and disordered female voices. *Journal of Speech, Language, and Hearing Research*, 42, 355–366.
- Chen, O. T. C., Chen, C.-Y., Cheng, H.-T., Hsu, F.-R., Yang, H.-L. & Lee, Y.-G. (1996). A multi-lingual speech recognition system using a neural network approach. Teoksessa *ICNN 96. The 1996 IEEE International Conference on Neural Networks*, (s. 1576–1581). New York, NY, USA: IEEE.
- Cottrell, M., Gaubert, P., Letremy, P. & Rousset, P. (1997). Analyzing and representing multi-dimensional quantitative and qualitative data: Demographic study of the Rhône valley. The domestic consumption of the Canadian families. *Prépublication du SAMOS79*, Université Paris 1, Paris.
- Flexer, A. (1999). On the use of self-organizing maps for clustering and visualization. Teoksessa *Principles of Data Mining and Knowledge Discovery, Third European Conference, PKDD '99*, Prague, Czech Republic, (s. 80–88). Berlin: Springer.
- Fujisaki, H. (1997). Modeling the process of fundamental frequency control of speech for synthesis of tonal features of various languages. Teoksessa *Proceedings of the 1997 China-Japan Symposium on Advanced Information Technology*, (s. 1–12).
- Goodacre, R., Pygall, J. & Kell, D. B. (1996). Plant seed classification using pyrolysis mass spectrometry with unsupervised learning: the application of auto-associative and Kohonen artificial neural networks. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 34, 69–83.
- Honkela, T., Pulkki, V. & Kohonen, T. (1995). Contextual relations of words in Grimm tales, analyzed by self-organizing map. Teoksessa F. Fogelman-Soulié & P. Gallinari (toim.), *Proc. ICANN'95, International Conference on Artificial Neural Networks*, (s. 3–7). Nanterre, France: EC2.
- Kohler, K. J. (1994). *Lexica of the Kiel PHON-DAT Corpus. Read Speech*. Institut für Phonetik und digitale Sprachverarbeitung, Universität Kiel.
- Kohonen, T. (1989). *Self-Organization and Associative Memory*. Berlin: Springer.
- Kohonen, T. (2001). *Self-Organizing Maps*. Springer Series in Information Sciences 30. Berlin: Springer, kolmas painos.
- Kohonen, T., Hynninen, J., Kangas, J. & Laaksonen, J. (1996). *SOM\_PAK: The self-organizing map program package*. Tekninen Raportti A31, Helsinki University of Technology, Laboratory of Computer and Information Science, Otaniemi.
- Kohonen, T., Torkkola, K., Shozakai, M., Kangas, J. & Ventä, O. (1987). Implementation of a large vocabulary speech recognizer and phonetic typewriter for Finnish and Japanese. Teoksessa *Proceedings of the European Conference on Speech Technology*, (s. 377–380). Edinburgh, U.K.
- Lagus, K. (2000). *Text Mining with the WEB-SOM*. Acta Polytechnica Scandinavica, Mathematics and Computing Series 110. Espoo: Finnish Academy of Technology.
- Miikkulainen, R. (1997). Dyslexic and category-specific impairments in a self-organizing feature map model of the lexicon. *Brain and Language*, 59, 334–366.
- Möbius, B. (1993). *Ein quantitatives Modell der deutschen Intonation: Analyse und Synthese von Grundfrequenzverläufen*. Linguistische Arbeiten 305. Tübingen: Niemeyer.
- Mujunen, R., Leinonen, L., Kangas, J. & Torkkola, K. (1993). Acoustic pattern recognition of /s/ misarticulation by the self-organizing map. *Folia Phoniatrica*, 45, 135–144.
- Ramesh, P., Katagiri, S. & Lee, C.-H. (1991). A new connected word recognition algorithm based on HMM/LVQ segmentation and LVQ classification. Teoksessa *Proc. ICASSP-91, International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing*, (s. 113–116). Piscataway, NJ: IEEE Service Center.
- Sammon Jr., J. W. (1969). A nonlinear mapping for data structure analysis. *IEEE Transactions on Computers*, C-18, 401–409.
- Silverman, K., Beckman, M. E., Pitrelli, J., Ostendorf, M., Wightman, C., Price, P., Pierrehumbert, J. & Hirschberg, J. (1992). ToBI: a standard for labeling English prosody. Teoksessa *Proceedings of the Second International Conference on Spoken Language Processing*, (s. 867–870). Banff.
- ˆt Hart, J. T., Collier, R. & Cohen, A. (1990). A

- perceptual study of intonation: an experimental-phonetic approach to speech melody.* Cambridge: Cambridge University Press.
- Tolba, A. S. & Abu-Rezq, A. N. (1999). Combined classifiers for invariant face recognition. *Teoksessa Proceedings 1999 International Conference on Information Intelligence and Systems*, (s. 350–359). IEEE Comput. Soc, Los Alamitos, CA, USA.
- Ultsch, A. (1993). Self-organized feature maps for monitoring and knowledge acquisition of a chemical process. *Teoksessa S. Gielen & B. Kappen (toim.), Proceedings of the International Conference on Artificial Neural Networks (ICANN93)*, (s. 864–867). London: Springer.
- Werner, S. (2000). *Modelle deutscher Intonation: zu Vergleichbarkeit und empirischer Relevanz von Intonationsbeschreibungen.* Publications in the Humanities 24. University of Joensuu.
- Xuemin, W., Junshi, C., Jincheng, T. & Jiapin, C. (1997). An identification algorithm for dynamic walking gait of quadruped walking robot. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 31, 17–19, 23.

## SELF-ORGANIZING MAPS AS A TOOL IN INTONATION RESEARCH

**Stefan Werner**

*Language Technology, Department of Foreign Languages  
University of Joensuu*

Self-organizing maps are a modern methodology that can be used for exploratory data analysis and which is especially useful in settings with a multitude of numerical variables. Its applicability to phonetic research is exemplified through an examination of acoustic parameters in speech intonation.

**Key words:** SOM, F0, intonation