

Eötvös Loránd Tudományegyetem

Biológia Doktori Iskola

Igazgató: Prof. Erdei Anna

Evolúcióbiológia és Elméleti Biológia Doktori Program

Igazgató: Prof. Szathmáry Eörs

Növényrendszertani, Ökológiai és Elméleti Biológiai Tanszék

Fedor Anna

Nyelvi rekurzió

A rekurzió tanulása mesterséges nyelvekben humán résztvevők és egy neurális háló által

Doktori értekezés tézisei

Témavezető:

Prof. Szathmáry Eörs

egyetemi tanár, az MTA levelező tagja



2012

1 Bevezetés

A nyelv eredete a tudomány egyik legnehezebb kérdése. Kutatása azért különösen nehéz, mert a nyelv nem fosszilizálódik, a genetikai kísérletezés embereken és emberszabású majmokon etikailag problémás, és mivel a nyelv kizárólag emberekre jellemző, az összehasonlító tudomány módszerei is csak korlátozva alkalmazhatók. Ezen nehézségek miatt a modellezés módszerei és a nyelv komponenseinek összehasonlító kutatása kerülnek előtérbe (Fedor, Ittész, & Szathmáry, 2009). Az emberi nyelv proto nyelvből való kialakulása volt valószínűleg az utolsó nagy evolúciós átmenet, és ennek kulcskomponense a rekurzió lehetett (Fedor, et al., 2009; Maynard Smith & Szathmáry, 1995). A rekurzió az a képesség, ami biztosítja, hogy végtelen számú gondolatot fejezzünk ki, az a művelet, ami az emberi nyelv korlátlan kifejezőerejéért felelős. Disszertációmban a nyelvnek ezen komponensét vizsgálom egy neurális háló és mesterséges nyelvtan tanulási kísérletek segítségével.

Egy általánosan elfogadott definíció szerint “a rekurzió egy olyan művelet, amely önmagát hívja meg, vagy egy olyan konstituens, ami egy önmagával egyező típusú konstituentet foglal magában” (Pinker & Jackendoff, 2005, p. 203). Ennek a definíciónak az első fele vonatkozhat az olyan mentális műveletekre, melyek képesek a saját kimenetüket a következő bemenetként kezelni. A rekurciónak ezt a tulajdonságát az emberi kogníció számos területe kihasználja, és mint ilyen, a rekurzió az eszközkészítéshez, az elme teóriához, a mentális időutazáshoz, a számoláshoz és még sok egyéb kognitív funkcióhoz szükséges. Például az eszközkészítés műveletének kimenete egy eszköz, melynek segítségével egy újabb eszközt lehet készíteni, melynek segítségével megint egy újabb eszközt lehet készíteni. Csak az emberek képesek ilyen komplexitású feladatokra.

A fenti definíció második felét általánosítva mindenféle struktúrára lehet alkalmazni. A rekurzív struktúrákat feltehetően rekurzív mentális műveletek segítségével produkáljuk és elemezzük, habár ez a kapcsolat még bizonyításra vár. Egy struktúra rekurzív, ha egy azonos típusú másik struktúrát magában foglal. Ebben a meghatározásban a “struktúra” és az “azonos típusú” sok mindent jelenthet, de az evolúciós nyelvészet mai irányzatában leginkább vizsgált struktúrák olyan frázisok, melyek más frázisokat foglalnak magukban.

Disszertációm egy speciális rekurzió-fajtára, az ún. középre beágyazott rekurzióra (KBR) koncentrál. A KBR valószínűleg minden emberi nyelvben jelen van, de hiányzik az állatok hangjelzéseiből; ezen kívül a véges állapotú és a frázis-struktúra nyelvtanokat is elválasztja a formális nyelvek Chomsky-féle hierarchiájában (Chomsky, 1956). A természetes nyelvekben a KBR olyan mondatokban van jelent, mint pl. “A kukorica, amit a

patkány megevett, a házban volt”. Három fő jellegzetessége van az ilyen mondatoknak: (1) az egyik frázis (*amit a patkány megevett*) be van ágyazódva egy másik frázisba (*a kukorica a házban volt*); (2) frázison belüli függőségek vannak különböző szófajú szavak között (itt főnevek és igék között: *a kukorica – volt, és a patkány – megevett*); és (3) a frázisok között is vannak függőségek: *amit a patkány megevett* jelöli a *kukoricát* (arról a kukoricáról van szó, amit a patkány megevett, nem bármely más kukoricáról).

Az ilyen típusú struktúrákat mesterséges nyelvtan tanulási (MNYT) kísérletek segítségével kutatják, ahol a kísérletben résztvevők mesterséges mondatokat hallanak-olvasnak, majd azt tesztelik, hogy megtanulták-e a mondatok alapjául szolgáló nyelvtani szabályt. A mondatok értelmetlen “szavakból” állnak (ezt nevezzük szótárnak), melyek gyakorlatilag bármilyen szimbólumok lehetnek, pl. betűk, vagy geometriai formák, de a legtöbb kísérletben egy mássalhangzóból és egy magánhangzóból álló szótagok. A módszert támogató elmélet szerint, úgy lehet a tiszta szintaktikát vizsgálni, ha a szemantikát (jelentést) eltávolítjuk a nyelvből. Az egyik előnye ennek a módszernek, hogy így állatokat és embereket ugyan azzal a stimulussal lehet tesztelni és így az eredmények közvetlenül összehasonlíthatóak (természetesen ehhez olyan szavakat kell választani, melyeket minden résztvevő könnyen meg tud különböztetni egymástól).

A KBR-rel kapcsolatos MNYT kísérletek első generációja (pl. Fitch & Hauser, 2004; Friederici, Bahlmann, Heim, Schubotz, & Anwender, 2006; Gentner, Fenn, Margoliash, & Nusbaum, 2006) a rekuziónak csak az első jellegzetességét, vagyis a beágyazást vette figyelembe. Ezekben a kísérletekben a négyszavas mondatokat az ABB (általánosságban az A^nB^n) képlettel lehetett leírni, ahol A és B két át nem fedő mesterséges szócsoporthoz jelöl. Ez azt jelenti, hogy az AB frázisok egymásba vannak ágyazva, de a frázisokon belüli és a frázisok közötti függőségeket nem modellezték. Ezek miatt az egyszerűsítések miatt, a feladatokat (nyelvtanilag szabályos és szabálytalan mondatok megkülönböztetése) meg lehetett oldani anélkül, hogy a résztvevők észrevették volna a mondatok rekurzív szerkezetét, egyszerűen az A és B szavak számának egyeztetésével (a szabálytalan mondatokban nem egyezett az A -k és B -k száma). Ezért ezt a típusú rekurziót számláló rekuziónak is nevezik (Corballis, 2007a, 2007b; Perruchet & Rey, 2005).

A kísérletek második generációjában megpróbálták kiküszöbölni ezt a problémát azzal, hogy fix A - B párokból állították össze a mondatokat. Ezeknek a mondatoknak az általános képlete $A_1A_2B_2B_1$ volt, ahol az indexek az adott A -k és B -k közötti függőségeket jelölik; bár a frázisok közti függőségek még mindig hiányoznak a mondatokból, a frázisokon

belüli függőségek már jelen vannak. Ezek a kísérletek változatos eredményeket hoztak. Perruchet és Rey (2005) és de Vries és mtsai. (2008) kísérletében részt vevő emberek nem tudták megtanulni a szabályt. Volt azonban két tanulmány, ahol a résztvevők elsajátították a KBR-t, mégpedig Bahlmann és mtsai. (2008) és Lai és Poletiek (2011) kísérleteiben.

2 Célok

Disszertációmban azokat a tényezőket vizsgáltam, amelyek befolyásolják a KBR megtanulhatóságát MNYT kísérletekben humán résztvevők segítségével, továbbá a KBR elemzéséhez szükséges komputációk neurális feltételeit egy neurális háló modellel. A disszertáció fejezetei a következő kérdésekre keresik választ:

- 3. fejezet – A rekurzió és a veremautomata: Mivel a hierarchikus struktúrák kezelése nagy sebességgel történik nyelvi értés és produkció közben, így ésszerűnek tűnik feltételezni, hogy ehhez egy speciális neurális hálózat áll rendelkezésre (Fedor, et al., 2009). Régóta bizonyított, hogy veremautomatával nagyon hatékonyan lehet KBR-t elemezni a szükséges push és pop műveletek segítségével (Hopcroft & Ullman, 1979). A célunk az volt, hogy neurálisan plauzibilis veremautomatát tervezzünk, mely képes megtanulni a KBR-t hiba-visszaterjesztés (backpropagation) nélkül.
- 4. fejezet – A rekurzió és a szóközi szünetek: Perruchet és Rey (2005) megismételte Fitch és Hauser (2004) kísérletét, hogy megnézzék, hogy a humán résztvevők mire alapozzák döntésüket, mikor a nyelvtanilag szabályos és szabálytalan mondatokat próbálják megkülönböztetni: valóban értik-e, hogy a struktúrák rekurzívan vannak egymásba ágyazva, vagy tudásuk felületesebb és csak a mondatok hang-mintázatát figyelik? Perruchet és Rey (2005) szerint az utóbbiról van szó. Azonban kísérletükben véleményünk szerint elkövették azt a hibát, hogy az elhangzó mondatok szavai között nem voltak szünetek, ami okozhatta azt, hogy különböző eredményt kaptak, mint Fitch és Hauser (2004): köztudott, hogy a folyamatos beszéd feldolgozása nehezebb, mint az olyan szövegé, ahol a szavak között szünetek vannak (pl. Newport & Aslin, 2004; Pena, Bonatti, Nespó, & Mehler, 2002). A mi kérdésünk az volt, hogy Perruchet és Rey állítása akkor is megállja-e a helyét, ha vannak szóközi szünetek.
- 5. fejezet – A rekurzió és a munkamemória: Meg tudják-e a kísérleti alanyok tanulni a KBR-t egy explicitebb tanítási módszer segítségével, ahol fokozatosan kapnak egyre hosszabb mondatokat, vannak diszkriminációs és mondat kiegészítő feladatok is

visszajelzéssel és hosszabb idő áll rendelkezésre (30 perc, míg az előző kísérletben csak 3 percük volt)? Befolyásolja-e a tanulás sebességét, hogy a feladat mennyire megterhelő a munkamemória számára? Könnyebb-e a feladat, ha a résztvevők láthatják a mondatokat leírva?

- 6. fejezet – A rekurzió és a szemantika: Vajon a szemantika hiánya miatt olyan nehéz megtanulni a KBR-t MNYT kísérletekben? Szemantikus tartalom hozzáadásával kiváltható-e a rekurzió gyorsabb elsajátítása és elemzése?

3 Módszerek

A disszertációban középre beágyazott, rekurzív mondatok/struktúrák alatt gyakorlatilag olyan sztringeket értünk, melyeknek a Bevezetésben leírt szerkezetük van: $A_1A_2B_2B_1$, ahol az A -k és a B -k két külön szócsoporthoz vett szavakat jelölnek, és az azonos index-szel jelölt “szavak” szópárokat alkotnak (vagyis mindig együtt fordulnak elő a megadott mintázaton belül). A kísérletekben és a szimulációban is, ezeket a mondatokat prezentáltuk a tanulóknak (humán résztvevőknek, illetve egy mesterséges neurális hálónak), majd a teljesítményüket olyan feladatokkal mértük fel, melyek rávilágítottak arra, hogy megtanulták-e a mondatok alapjául szolgáló szabályt. A különbség a kísérletek között abban volt, hogy milyen szavakból szerkesztettük a mondatokat és azokat hogyan prezentáltuk a tanulóknak.

- A 3. fejezetben egy neurális háló modellt írok le, mely képes megtanulni a KBR-t és a végrekurziót is kapuzó neuronok és egy veremautomata-szerű memória segítségével. A modell alapján véve konnekcionista, ami azt jelenti, hogy az információ feldolgozása mesterséges idegsejtek hálózatának aktivitási mintázatán alapszik. Lokális reprezentációkat használtunk, vagyis szavanként csak egy idegsejt volt aktív. A modellt nyelvtanilag szabályos mondatokkal tanítottuk, míg a tesztelés során a modellnek szabályos és szabálytalan mondatokat kellett megkülönböztetnie. A modellt a Hebb-i módszerrel és a perceptron szabállyal tanítottuk. Modellünk újdonsága a veremautomata neurális implementációjában rejlik, melyet kapuzó neuronok irányítanak.
- A disszertáció többi része MNYT kísérleteket ír le, melyeknek humán résztvevők voltak az alanyai. Az első kísérlet során (A rekurzió és a szóközi szünetek) a résztvevők a KBR-nek megfelelő négy –és hatszavas mondatokat (tehát egyszeres,

illetve kétszeres beágyazásokat) hallgattak random sorrendben. A szavak mesterséges msh-mgh szótagok voltak; a szavak közti függőségeket a szavak együttes előfordulása biztosította. A kísérleti alanyokat nyelvtanilag szabályos mondatokhoz való 3 perces habituációt követően diszkriminációs feladattal teszteltük.

- A második kísérletben (A rekurzió és a munkamemória) a szavak hasonlóak voltak, de a szavak közti függőségeket fonetikai szabályok is megerősítették: a párban álló szavak ugyan azzal a mássalhangzóval kezdődtek. A tanítás is explicitebb volt, mint az előző kísérletben: a nyelvtanilag helyes mondatok hallgatásán kívül a résztvevőknek meg kellett különböztetniük szabályos és szabálytalan mondatokat és hiányos mondatokat kellett kiegészíteniük. Ezeknél a feladatoknál visszajelzést is kaptak döntéseik helyességéről, így a résztvevők kísérletezhettek különböző hipotézisekkel, különböző szabályokat próbálhattak ki és megnézhatték, hogy jók-e vagy sem. Ráadásul a stimulusokat a “kevéssel kezdés” paradigma szerint adagoltuk: a résztvevők először kétszavas (első szint), majd négyzavas (második szint), végül hatszavas (harmadik szint) mondatokat kaptak. A résztvevők egyik fele csak hallgathatta a mondatokat, míg a másik fele írásban is megkapta azokat.
- A harmadik kísérletben (A rekurzió és a szemantika) a tanítási módszerek hasonlóak voltak, mint az előző kísérletben: a mondatok növekvő hosszúság szerint voltak rendezve és a résztvevők nyelvtanilag szabályos mondatokhoz való habituáció és diszkriminációs feladatok segítségével tanulhattak; utóbbinál visszajelzést is kaptak (mondatkiegészítéssel itt nem volt). A mondatok szavait számítógép-képernyőn olvashatták egymás után, egyenként; a mondatokat nem látták egyben, mint az előző kísérletben. Ebben a kísérletben a résztvevőket négy csoportra osztottuk és mindegyik csoport mondatait más-más szótárból állítottuk össze. Az első szótár kétbetűs magyar szavakból állt, melyeket jelentésük alapján párosítottunk össze (pl. eb – ól, fű – fa). A második szótár részben az első szótár szavaiból állt: az *A* csoportba tartozó szavak azonosak voltak, de a *B* csoportba tartozó szavak különböztek. Ezeket úgy választottuk, hogy ne legyen semmilyen nyilvánvaló jelentésbeli kapcsolat az *A* és *B* csoport szavai között (pl. eb – ón, fű – ma). A harmadik és a negyedik szótár értelmetlen szavakból (msh-mgh, vagy mgh-msh szótagokból) állt, melyeket véletlenszerűen párosítottunk. A különbség a két szótár között az volt, hogy az egyik magyarosabban hangzott, mert voltak benne a magyarra jellemző hosszú

magánhangzók (pl. ev – ób, fé – ísz), míg a másik azokhoz hasonlított, amit pl. német tanulmányokban használtak (pl. fe - ko, bi - mo; Bahlmann, et al., 2008; Friederici, et al., 2006).

4 Tézisek

1. Míg az régóta tudott, hogy a rekurzív mondatokat lehet szimbolikus veremautomatával elmezni, tudtunkkal eddig nem volt egyszerű neurális megvalósítása ennek az eszköznek. Mivel azok a szimbolikus modellek, melyeket nem lehet neurálisan megvalósítani implauzibilisek (Christiansen & Chater, 2001), így fontos megnéznünk, hogy lehetséges-e a veremautomatát mesterséges neuronok segítségével létrehozni. Bemutatjuk, hogy a veremautomata neurálisan elég egyszerűen implementálható, ha a push-pop műveleteket kapuzó neuronok irányítják. Ezzel nem azt akarjuk állítani, hogy ez az architektúra izoláltan és tisztán jelen van az agyban, hanem azt, hogy valószínűleg ehhez hasonló szerkezetek a szélesebb, nyelvvel kapcsolatos hálózati kontextusban vannak jelen.
2. Megismételtük Perruchet és Rey (2005) kísérletét azzal a fő különbséggel, hogy a mi stimulusunkban voltak szóközti szünetek, míg az ő mondataik msh-mgh szótagok folyamatos sorozatai voltak. Feltételeztük, hogy a kísérleti alanyok azért nem tudták kísérletükben megtanulni a KBR-t, mert a folyamatos beszéd feldolgozása a szavakra tagolthoz képest magasabb igényeket támaszt. Feltételezésünk nem bizonyult igaznak: kísérletünkben nagyon hasonló eredményeket kaptunk, mint Perruchet és Rey (2005), vagyis hiába voltak szünetek a szavak között, a résztvevők nem tudták megtanulni a KBR-t 3 perc habituáció alatt. Ez megerősíti Perruchet és Rey (2005) hipotézisét, miszerint a Fitch és Hauser (2004) kísérletében résztvevők valószínűleg csak a hangmintázataik alapján különböztették meg a nyelvtanilag szabályos és szabálytalan mondatokat.
3. Könnyebb a KBR-t megtanulni, ha az írott mondatok rendelkezésre állnak, így a munkamemória terhe kisebb. Ez az eredmény egybecseng azzal a ténnyel, hogy a KBR gyakoribb írott, mint beszélt nyelvben. Továbbá a diszkriminációs feladatok könnyebbek a mondatkiegészítő feladatoknál, ami a klasszikus nyelvértés/produkció asszimmetriát tükrözi. Azt vártuk, hogy a szópárok memorizálása lesz a legnehezebb feladat, de amint ez sikerült, a KBR-t észrevenni könnyű, mivel a szópárok teljesen

újak és mesterségesek a résztvevők számára, míg a KBR, mint elvont struktúra minden természetes nyelvben jelen van. Azonban azt találtuk, hogy nem a szópárok megjegyzése volt a szűk keresztmetszet; a középre beágyazott struktúrák elsajátítása volt a nehezebb feladat.

4. A résztvevők négy csoportja próbálta megtanulni a KBR-t négy különböző szótárral, melyek négy fokozatot képviseltek a szemantikai tartalmuk szempontjából három tényező szerint: van-e a szavak között szemantikai kapcsolat, van-e a szavaknak szemantikai tartalma (valódi szavak és mesterséges szavak) és mennyire könnyű a jelentés nélküli mesterséges szavakhoz valamilyen jelentést társítani. Elemzésünk azt mutatja, hogy a szavak közti nyilvánvaló szemantikai kapcsolat segítette a szavak közti asszociációk kiépítését (vagyis a szópárok megtanulását), de a többi tényező egyenként nem okozott különbséget. Két tényező együttes jelenléte azonban mindig befolyásolta a KBR megtanulását, és hosszabb mondatokra való alkalmazását. Összességében elmondható, hogy a szótárak szemantikus tartalma általánosságban befolyásolta a KBR megtanulásának sebességét.

5 Konklúziók

A MNYT kísérletek első generációja után megállapíthattuk, hogy míg a számláló rekurzióknak megfelelő mesterséges mondatokat *lehet* rekurzívan értelmezni, nagyon valószínűtlen, hogy egy tanuló ezt tenné. A legtöbb esetben a mesterséges nyelv tanulója (beleértve a modelleket, embereket és állatokat is) csak azokat a szabályszerűségeket fogja megtanulni, amelyek feltétlenül szükségesek a mondatok értelmezéséhez és ezek nem feltétlenül esnek egybe azokkal a szabályokkal, amiket a mondatok szerkesztője tartott szem előtt. A frázisok közti függőségek bevezetése a MNYT kísérletekbe még várat magára, a frázisokon belüli függőségek (szópárok) viszont most már minden újabb kísérletben szerepelnek, és így biztosítják, hogy a tanulók megtanulják a mondatok középre beágyazott struktúráját.

A KBR megtanulása azonban nem jelenti azt, hogy a mondatok processzálása is rekurzív folyamatokon keresztül zajlik. Lehetséges az is, hogy bár a kikövetkeztetett absztrakt szabály a középre beágyazásról szól, a mondatok beszéd közbeni elemzése szekvenciális. Ugyanez megtörténhet természetes nyelvek értelmezése közben is: az emberek

analitikusan értik a rekurziót és a rekurzív szabályok alkalmazhatók az élet szinte minden területén, de a mondatokat nem rekurzívan kezeljük a természetes diskurzus során.

6 A szerző publikációi a disszertációval kapcsolatban

1. Anna Fedor, Máté Varga, Eörs Szathmáry (2012). Semantics boosts syntax in artificial grammar learning tasks with recursion. *Journal of Experimental Psychology – Learning, Memory and Language*, *accepted manuscript*.
2. Anna Fedor, Péter Ittész, Eörs Szathmáry (2010). Parsing recursive sentences with a connectionist model including a neural stack and synaptic gating. *Journal of Theoretical Biology*, 271, 100–105.
3. Fedor Anna, Ittész Péter, Szathmáry Eörs (2010). A nyelv evolúciójának biológiai háttere (*Biological background of language evolution*). *Magyar Tudomány*, 171, 541-548.
4. Anna Fedor, Péter Ittész and Eörs Szathmáry (2009). The biological background of syntax evolution. In: *Biological foundations and origin of syntax*, pp. 15-40. Eds.: Bickerton, D., and Szathmáry, E. Strüngmann Forum Report, vol. 3. Cambridge, MA: The MIT Press.
5. Anna Fedor, Jens Brauer, David Caplan, Angela D. Friederici, Balázs Gulyás, Peter Hagoort, Tatjana Nazir, Csaba Pléh and Wolf Singer (2009). What are the brain mechanisms underlying syntactic operations? In: *Biological foundations and origin of syntax*, pp. 299-324. Eds.: Bickerton, D., and Szathmáry, E. Strüngmann Forum Report, vol. 3. Cambridge, MA: The MIT Press.
6. Eörs Szathmáry, Zoltán Szatmáry, Péter Ittész, Gergő Orbán, István Zachár, Ferenc Huszár, Anna Fedor, Máté Varga, Szabolcs Számadó (2007). In silico Evolutionary Developmental Neurobiology and the Origin of Natural Language. In: *Emergence of Communication and Language*, Springer, London. Eds: Caroline Lyon, Chrystopher Nehaniv, Angelo Cangelosi. pp. 151-187.

7 Irodalomjegyzék

- Bahlmann, J., Schubotz, R. I., & Friederici, A. D. (2008). Hierarchical artificial grammar processing engages Broca's area. *Neuroimage*, 42(2), 525-534.
- Chomsky, N. (1956). Three models for the description of language. *Information Theory, IRE Transactions on*, 2(3), 113-124.
- Christiansen, M. H., & Chater, N. (2001). Connectionist psycholinguistics in perspective. In M. H. Christiansen & N. Chater (Eds.), *Connectionist Psycholinguistics* (pp. 19-76): Greenwood Publishing Group.
- Corballis, M. C. (2007a). On phrase structure and brain responses: A comment on Bahlmann, Gunter, and Friederici (2006). *Journal Of Cognitive Neuroscience*, 19(10), 1581-1583.
- Corballis, M. C. (2007b). Recursion, language, and starlings. *Cognitive Science*, 31(4), 697-704.
- De Vries, M. H., Monaghan, P., Knecht, S., & P., Z. (2008). Syntactic structure and artificial grammar learning: The learnability of embedded hierarchical structures. *Cognition*, doi:10.1016/j.cognition.2007.09.002.
- Fedor, A., Itzész, P., & Szathmáry, E. (2009). The biological background of syntax evolution. In D. Bickerton & E. Szathmáry (Eds.), *Biological foundations and origin of syntax. Strüngmann Forum Report* (Vol. 3, pp. 15-40). Cambridge, MA: The MIT Press.
- Fitch, W. T., & Hauser, M. D. (2004). Computational constraints on syntactic processing in a nonhuman primate. *Science*, 303(5656), 377-380.
- Friederici, A. D., Bahlmann, J., Heim, S., Schubotz, R. I., & Anwender, A. (2006). The brain differentiates human and non-human grammars: Functional localization and structural connectivity. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 103(7), 2458-2463.
- Gentner, T. Q., Fenn, K. M., Margoliash, D., & Nusbaum, H. C. (2006). Recursive syntactic pattern learning by songbirds. *Nature*, 440(7088), 1204-1207.
- Hopcroft, J. E., & Ullman, J. D. (1979). *Introduction to Automata Theory, Languages, and Computation*. Reading, MA: Addison-Wesley.
- Lai, J., & Poletiek, F. H. (2011). The impact of adjacent-dependencies and staged-input on the learnability of center-embedded hierarchical structures. *Cognition*, 118(2), 265 - 273.
- Maynard Smith, J., & Szathmáry, E. (1995). *The Major Transitions in Evolution*. Oxford: Freeman.
- Newport, E. L., & Aslin, R. N. (2004). Learning at a distance I. Statistical learning of non-adjacent dependencies. *Cognitive Psychology*, 48(2), 127-162.
- Pena, M., Bonatti, L. L., Nespors, M., & Mehler, J. (2002). Signal-driven computations in speech processing. *Science*, 298(5593), 604-607.
- Perruchet, P., & Rey, A. (2005). Does the Mastery of Center-Embedded Linguistic Structures Distinguish Humans from Nonhuman Primates? *Psychonomic Bulletin & Review*, 12, 307-313.
- Pinker, S., & Jackendoff, R. (2005). The faculty of language: what's special about it? *Cognition*, 95(2), 201-236.