

Szegedi Tudományegyetem
Szent-Györgyi Albert Orvostudományi Kar
Elméleti Orvostudományok Doktori Iskola

**A vizuális, időbeli szabályszerűségek implicit, statisztikai elsajátításnak viselkedéses és
kérgi bizonyítékai**

PhD Tézis

Sáringi Szabolcs MD

Szegedi Tudományegyetem, Szent-Györgyi Albert Orvostudományi Kar, Élettani Intézet

Témavezető:

Kaposvári Péter MSc, PhD

Szegedi Tudományegyetem, Szent-Györgyi Albert Orvostudományi Kar, Élettani Intézet

Szeged,

2024

Az értekezés alapjául szolgáló közlemények:

Sáringer, Szabolcs, Ágnes Fehér, Gyula Sály, and Péter Kaposvári

"Online measurement of learning temporal statistical structure in categorization tasks"

Memory & Cognition 50, no. 7 (2022): 1530-1545.

IF: 2.4, SJR indicator (Experimental and Cognitive Psychology): Q1

Sáringer, Szabolcs, Ágnes Fehér, Gyula Sály, and Péter Kaposvári.

"Gamma oscillations in visual statistical learning correlate with individual behavioral differences"

Frontiers in Behavioral Neuroscience 17 (2023)

IF: 3.0, SJR indicator (Neuropsychology and Physiological Psychology): Q1

Kumulatív IF: 5.4

Az értekezéshez közvetlenül nem kapcsolódó közlemény:

Sáringer, Szabolcs, Péter Kaposvári, and András Benyhe

"Visual linguistic statistical learning is traceable through neural entrainment."

Psychophysiology (2024): e14575.

IF: 3.7, SJR indicator (Cognitive Neuroscience): Q1

Sáringer, Szabolcs, Ágnes Fehér, Gyula Sály, and Péter Kaposvári

"Perceptual Expectations Are Reflected by Early Alpha Power Reduction."

Journal of Cognitive Neuroscience (2024): 1-15.

IF: 3.2, SJR indicator (Cognitive Neuroscience): Q1

Kumulatív IF: 12.3

Bevezetés

A központi idegrendszerünk hatalmas mennyiségű információt gyűjt össze a minket körülvevő környezetből. Ezen információmennyiség közvetlen feldolgozása túlterhelné a rendszert és az értelmés észlelet kialakítása lehetetlen lenne. A szenzoros rendszer több módszert használ a terhelés csökkentésére, pl. a szenzoros szűrés vagy a szegmentáció, melynek alapja lehet a beérkező stimulusok közötti statisztikai kapcsolatok. Az ismétlődő információ feldolgozásának elhárításával csökkenthető a szenzoros terhelés, valamint kérgi területek számíthatnak bizonyos ingerek beérkezésére. Összefoglalóan, a környezeti statisztikai információ felfedezését, elsajátítását majd használatát statisztikai tanulásnak nevezzük.

A statisztikai tanulást évtizedek óta széleskörben kutatják és elmondható róla, hogy a szenzoros feldolgozás és a percepció elemi része, amely egy modalitásokon és paradigmákon átívelő jelenség. Ennek ellenére a viselkedéses és neurológia vizsgálatok eredményei azt mutatják, hogy a statisztikai tanulás eredményei adott modalitásban nem teljesen ültethetőek át másik modalitásokra. Ezen felül nem csak az ingerek modalitása, de a paradigma „felügyelése” is befolyásolja a tanulás kimenetelét. Statisztikai tanulás megjelenik felügyelet nélküli paradigmákban, vagyis bármiféle külső, explicit utasítás nélkül a megtanulandó statisztikai információival kapcsolatban. Sok tanulmány azonban „csaknem-felügyelt” elrendezést használ, ahol a résztvevőket tájékoztatják az ingerek között elrejtett szabályszerűség tényéről, de annak pontos paramétereit nem ismertetik. Ennek köszönhetően a résztvevők aktívan keresik a statisztikai kapcsolatokat, ami egy explicit tudás kialakulásához vezethet, ez pedig más neurológiai háttért kíván. Ezeknek a megfigyeléseknek köszönhetően elmondhatjuk, hogy a statisztikai tanulási eredmények nem vonhatóak össze meg gondolások nélkül és sok esetben ezeket önálló entitásként kell kezelnünk a modalitásuk, felügyeletük és egyéb paraméterek alapján.

Az EEG egy alkalmas eszköz a statisztikai tanulás vizsgálatára tekintve a magas időbeli felbontását, amivel rövid életű kardiális változásokat tudunk kimutatni a tanulással kapcsolatosan. Sok frekvenciasávot hoztak már kapcsolatba ezen tanulási folyamattal. Az alacsony frekvenciájú téta sávot (4-7 Hz) modulálja az inger megjósolhatósága és a tanulás, ami nem meglepő tekintve annak szoros kapcsolatát a munkamemóriához. Az alfa oszcillációk (8-12 Hz) is szerepet játszanak az expektancia feldolgozásában. Az alfa teljesítmény negatív korrelációt mutat megjósolhatósággal, hiszen váratlan stimulusok

magasabb alfa amplitúdót váltanak ki. A béta sáv (~20 Hz) változásait is megfigyelték már vizuális és auditoros statisztikai tanulások paradigmákban.

A két leggyakrabban tanulmányozott modalitás a vizuális és az auditoros. Ahogy korábban említésre került, ezen eredményeket nem lehet fenttartások nélkül általánosítani. A vizuális modalitáson belül, egy kevésbé tanulmányozott aspektus a teljesen felügyelt nélküli, implicit vizuális statisztikai tanulása. Számos tanulmány használ vizuális ingereket, de sok esetben a résztvevők utalást kapnak valamilyen elrejtett szabályszerűségről. Ez miatt a vizuális statisztikai tanulás teljeskörű leírása, annak viselkedéses és idegi háttérnek ismerete még hiányos az irodalomban. Azonban számos előzetes ismeretünk van korábbi tanulmányokból.

A tanulás görbáját korábban leírták egy vizuális paradigmában. Ebben a saját iramú elrendezésben sikeres jellemezték a vizuális tanulás görbáját egy két opciós kényszerválasztás feladat segítségével melynek során online, reakcióidő segítségével követték a tanulást. A bemutatás azonban nem volt felügyelet nélküli, hiszen a résztvevőket tájékoztatták a szabályszerűség meglétéről. Ennek ellenére fontos információval szolgál a vizuális statisztikai tanulás során fellépő viselkedéses válaszokkal kapcsolatban.

Egy teljesen implicit vizuális paradigmát használtak már korábban, amellyel viselkedéses és idegi megfigyelésekkel is hozzájárultak az irodalomhoz. Ezen fMRI kísérlet során a résztvevőknek egy képszekvenciát mutattak be, amely arcokat és tájakat tartalmazott. A résztvevőket csak arról tájékoztatták, hogy kategorizálják a felbukkanó képet egy gombnyomás segítségével. A résztvevők tudta nélkül a szekvencia asszociált képpárokat tartalmazott, amelyek mindig egymást követték a megjelenés során fix sorrendben. Így a képpár második tagja megjósolhatóvá vált. A párok második tagjára gyorsabban válaszoltak résztvevők. Ezen felül megjelent egy várakozási hatás is, ami a stimuluspár első tagjára adott megnyúlt reakcióidőt jelentette. A várakozási hatás megfigyelése a paradigma során használt ún. egyedülálló képek köszönhetően volt lehetséges, amelyeknek nem volt a véletlenszerűn felül statisztikai kapcsolata semelyik másik ingerrel sem és nem vettek részt semmilyen formában a tanulásban. A párok elsajátítását egy familiaritás teszt is igazolta.

A képszekvencia azonban további információt is tartalmazott az asszociált párokon felül. A képpárokat mindig különböző kategóriájú képek alkották, Így a résztvevő szempontjából nagyobb esély volt, hogy a következő kép ellentétes kategóriájú lesz, mint a mostani. Ezen felül a kategória ismétlése csak az egyedülálló és a képpárok első tagjaira eshetett. Mivel ennek kisebb volt az esélye, ez egy motoros műterméket vihetett a mérésbe, ami meghosszabbítja a nem megjósolható stimulusok reakcióidejét.

Célkitűzés

A célunk az volt, hogy megvizsgáljuk egy vizuális szekvencia felügyelet nélküli, implicit, statisztikai tanulását, ahol egy fel nem fedett időbeli szabályszerűség volt elhelyezve a képek sorrendjébe. Korábbi tanulmányok eredményeit árnyalja, hogy a paradigma nem felügyelet nélküli volt, vagy a tanulást módosította magasabb szintű információ. Ehhez egy korábban alkalmazott felügyelet nélküli vizuális paradigmát adaptáltunk és vizsgáltunk meg. Megfigyeltük a lehetséges faktorokat, amelyek hatással vannak a viselkedéses eredményekre és módosítottuk a kísérleti elrendezést, hogy az implicit, vizuális, statisztikai tanulás viselkedéses bizonyítékait tudjuk megfigyelni. A reakcióidők online regisztrálása hozzásegít bennünket, hogy ne csak a tanulás létrejöttét, de annak progresszióját is megfigyelhessük. Ezen tanulási görbe leírása tovább segíthet bennünket a statisztikai tanulás mögött álló komplex hálózat megismeréséhez.

A viselkedéses tulajdonságok leírása után tovább módosítottuk a kísérleti elrendezést, hogy alkalmas legyen EEG felvétel készítésére. A kortikális aktivitások felvételével olyan kérdésekre kerestük a választ, amelyek nem csak a statisztikai tanulás megértésében, de azt befolyásoló faktorokra is kiterjed és segíthet megérteni az egyéni faktorokat, amelyek hatással vannak a folyamatra.

Anyagok és módszerek

Viselkedéses kísérlet

Ia kísérlet

Az első kísérletünkben újra alkottuk Turk-Browne (2010) paradigmáját eltérő képekkel. Harmincnyszolc önkéntes (20 nő, átlag életkor: 25,34 év, tartomány: 21-41 év) vett részt az Ia kísérletben. Mindegyikőjük tájékoztatás után írásban beleegyezett a kísérletbe, melynek protokollját elfogadta a Szegedi Tudományegyetem Etikai Bizottsága (266/2017-SZTE). Öt alanyt kizártunk a kísérletből, mert a teljesítményük 60% alatt volt a kísérletben.

A kísérlet stimulusaként mindennapi tárgyak fekete-fehér képeit használtuk, amelyeket a Bank of Standardized Stimuli stimuluskészletből választottunk. Ezekből a képekből készítettük el a szekvenciát, amelyet prezentáltunk a résztvevőknek. Nyolc blokkon át mértük a reakcióidőket és a válaszok helyességét. Egy blokkban nyolc kép formált négy asszociált stimuluspárt, amelyek mind egymást követték a képsorban. További négy kép egyedülálló képként szolgáltak kontrollként. Minden képet hatszor mutattunk be. A képátmenet két kategória alá eshetett: kategória-ismétlő vagy kategória-váltó. Ezek a fogalmak azt jelentették, hogy az egymást követő képek kategóriája megegyező vagy eltérő. Az első kísérletben minden asszociált pár kategória-váltó volt.

A résztvevőknek gombnyomással kellett jelezniük a prezentált kép kategóriáját. A résztvevőink továbbá teljesen naivok voltak a szekvenciára, valamint az abban elrejtett szabályszerűsége is. A nyolc blokk után egy rövid interjú során bizonyosodtunk meg, hogy a szabályszerűség implicit maradt-e.

Az átlag reakcióidőket a különböző kondíciókban egy utas ismételt méréses varianciaanalízis és Tukey-Kramer teszt segítségével, míg a válaszok helyességét Friedman és Wilcoxon tesztek segítségével hasonlítottuk össze.

A szekvencián belüli pozíciójuk alapján a stimulusokat három kondícióba soroltuk: P1, P2 és S. Az ingerpárok első tagját P1, a másodikat P2, míg az egyedülálló képeket S-nek neveztük. Az elmélet szerint a P1 képek várakozási hatást hoznak létre, míg a megjósolható P2 képekre előfeszítést kellene tapasztalnunk. Az S képek kontrollként szolgálnak, hogy mind a várakozást, mind az előfeszítést megfigyelhessük.

1b kísérlet

Az első kísérlet szekvenciájában feltételezett motoros mintázat bizonyítására a szekvencia generálását módosítottuk a második kísérletben. Így kategória-ismétlő és kategória-váltó párok egyensúlyban fordultak elő. A kísérlet többi paraméterét változatlanul hagytuk.

Harmincnolc önkéntes (18 nő, átlagéletkor: 27,6 év, tartomány: 21-42 év) vett részt az 1b kísérletben. Mindegyikőjük tájékoztatás után írásban beleegyezett a kísérletbe, melynek protokollját elfogadta a Szegedi Tudományegyetem Etikai Bizottsága (266/2017-SZTE). Három alanyt kizártunk a kísérletből alacsony teljesítmény miatt.

2 kísérlet

Az 1a és 1b kísérlet alapján tovább módosítottuk a paradigmát. Megváltoztattuk a kategorizációs feladatot. Megemeltük az egyedülálló stimulusok számát, a résztvevők számát és a képek ismétlésének számát is. Változó hosszúságú intertrial intervallumot (ITI) alkalmaztunk, valamint a szekvencia elejére helyeztünk egy bevezetőt, amely során random módon bemutattuk a később látott képeket, hogy a résztvevők hozzászokjanak a feladathoz.

Nyolcvanhét önkéntes (48 nő, átlagéletkor: 21,3 év, tartomány: 18-28 év) vett részt az 1b kísérletben. Mindegyikőjük tájékoztatás után írásban beleegyezett a kísérletbe, melynek protokollját elfogadta a Szegedi Tudományegyetem Etikai Bizottsága (266/2017-SZTE). Négy alanyt kizártunk a kísérletből alacsony teljesítmény miatt.

Tizenhat képet választottunk ki a harmadik kísérlethez. Ezek közül nyolc mindennapi tárgyak fekete-fehér képe volt, míg a maradék fekete-fehér állatképek. Az ingerbemutató első 10 ismétlése random sorrendben történt, az utolsó 15 ismétlés pedig tartalmazta az időben asszociált ingerpárokat, amelyekkel az első 10 ismétlésben familiarizálódtak a résztvevők. A méret alapú kategorizációs feladatot megváltoztattuk és a résztvevőknek arra kellett válaszolniuk, hogy állatot vagy tárgyat látnak gombnyomás segítségével. A bemutatás végén egy rövid interjúval győződünk meg a paradigma implicit jellegéről.

A reakcióidők összehasonlításához lineáris vegyes modellt használtunk maximális valószínűségi kritériummal. A fix hatásokat III típusú varianciaanalízissel értékeltük ki, a szabadságfokokat pedig Satterthwaite módszerrel határoztuk meg. *Post hoc* analízisben Tukey korrigált becsült marginális hatértékeket használtunk, az interakcióhoz pedig a lineáris trendek becsült marginális értékeit. A válaszhelyesség hatását binomiális eloszlású általánosított lineáris vegyes modell határoztuk meg, melyben a fix hatásokat III típusú Wald χ^2 teszttel értékeltük.

EEG kísérlet

A későbbiekben adaptáltuk a paradigmánkat EEG-re, melynek során a tanulás online monitorozását elhagytuk és helyette offline, a familiaritás teszt segítségével követtük a tanulást. A megváltoztatott paradigmát egy viselkedéses előtanulmányban teszteltük.

Az előkísérletben 17 résztvevő állt a rendelkezésünkre (9 nő, átlagéletkor: 25,7 év, tartomány: 20-26 év), míg az EEG felvételek során 30 fő (16 nő, átlagéletkor: 26,4 év, tartomány: 21-37 év). Mindegyikőjük tájékoztatás után írásban beleegyezett a kísérletbe, melynek protokollját elfogadta a Szegedi Tudományegyetem Etikai Bizottsága (266/2017-SZTE). Egy alanyt kizártunk a kísérletből alacsony jel-zaj arány miatt.

A résztvevők 3 blokkban látták a képszekvenciákat. Egy blokkban 16 képet mutattunk be 25-ször, amelyek mindennapi tárgyak voltak. A szekvenciába 12 állat képét szűrtük be véletlenszerűen, mint detekciós feladat, ezzel fenntartva a résztvevők figyelmét. A képek első 10 prezentációja random volt, míg a második 15 bemutatás tartalmazta az asszociált képpárokat. A 3 szekvencia után a tanulást az utolsó szekvenciára fókuszált familiaritás teszttel konfirmáltuk. A teszt két opciós kényszerválasztás kialakítású volt, melynek során 32 képpárt mutattunk be.

A felvételekhez 64 csatornás Biosemi Active II rendszert használtunk. Az adatok előkészítését az EEGLAB programcsomaggal végeztük, MATLAB programkörnyezetben, míg a további elemzését A FieldTrip csomagban végeztük. Az elemzés során kiváltott válasz (ERP), idősor (TF), valamint intertrial fáziskohérenca (ITPC) analízist végeztünk.

A familiaritás teszt válaszait szenzitivitássá (A') konvertáltuk a módosított Grier formula szerint. Ezt ezután egymintás t-teszttel hasonlítottuk 0,5 értékhez. Ezen felül a szenzitivitás értékek segítségével két csoportra osztottuk a résztvevőket: véletlenszerű felett ($AC, A' > 0,5$) és véletlenszerűen teljesítők ($C, A' \leq 0,5$).

A kondíciók között az ERP-eket cluster-alapon korrigált permutációs statisztikával hasonlítottuk össze. Az idősorokat Morlet wavelettel nyertük ki, később pedig az összes adat átlagolásának megvizsgálásával egy ablakot határoztunk meg. Ezen ablak átlagértéket korreláltattuk az A' értékekkel Pearson korreláció segítségével. Ezután, az ablak átlag teljesítményének skalpi eloszlását vizsgáltuk meg csoportok és kondíciók között. A skalpi eloszlásokat szintén cluster-alapú korrekciós permutációs statisztikával hasonlítottuk össze.

Végezetül az ablak ITPC értéket hasonlítottuk egy ugyanakkora prestimulus ablakhoz Wilcoxon teszttel.

Eredmények

Viselkedéses tanulmány

1a kísérlet

A reakcióidők nagy különbséget mutattak a kondíciók között ($F(2,64)=10,002$, $p<0,001$). A páronkénti összehasonlítás priming hatást mutattak a P2 kondícióra (átlag=0,592 s, $SD=0,123$ s), mivel az átlag reakcióidő alacsonyabb volt, mint a P1 (átlag=0,614 s, $SD=0,133$ s, $q=3,94$, $p=0,001$) vagy az S kondíció esetén (átlag=0,611 s, $SD=0,133$ s, $q=3,484$, $p=0,004$). A P1 és S kondíciók összehasonlítása nem mutatott különbséget. A válaszok helyessége szintén priming hatást mutatott ($n=33$, $\chi^2=20,33$, $p>0,001$). A *post hoc* analízis a P2 kondícióra adott magasabb arányú helyes válaszokat mutatta (medián = 0,95, $IQR = 0,063$), összehasonlítva a P1 (medián=0,931, $IQR=0,086$, $z=-3,45$, $p<0,001$) és S kondíciókkal (medián=0,913, $IQR=0,07$, $z=-3,806$, $p<0,001$).

Egy, a kategória-ismétlő képtranzíciók eltávolítása utáni újraelemzéssel a reakcióidő hatások eltűntek ($F(2,64)=0,145$, $p=0,866$). A P2 kondíció (átlag=0,592 s, $SD=0,119$ s) nem különbözött a P1 (átlag=0,595 s, $SD=0,112$ s) vagy az S kondíciótól (átlag=0,594 s, $SD=0,132$ s). A válaszok helyességében is eltűnt a hatás ($n=33$, $\chi^2=0,14$, $p=0,934$) a P2 (medián=0,95, $IQR=0,064$), a P1 (medián=0,942, $IQR=0,084$) és az S kondíció között (medián=0,94, $IQR=0,057$).

1b kísérlet

A varianciaanalízis tendenciát mutatott a reakcióidőkben ($F(2,68)=2,458$, $p=0,093$) a három kondíció között (P1: átlag=0,618 s, $SD=0,097$; P2: átlag=0,611 s, $SD=0,097$; S: átlag=0,617 s, $SD=0,097$ s). A válaszok helyessége nem mutatott különbséget ($n=35$, $\chi^2=0,41$, $p=0,814$; P1: medián=0,944, $IQR=0,064$; P2: medián=0,95, $IQR=0,052$; S: medián=0,944, $IQR=0,064$).

Az 1a és 1b kísérlet összehasonlítása

A Holm-Bonferroni korrigált t-teszt egy tendenciát mutatott ($t(66)=2,083$, $p=0,082$) a P2 és S kondíciók reakcióidő különbségében az 1a (átlag=0,019, $SD=0,031$) és 1b kísérlet (átlag=0,006, $SD=0,019$) között, míg a Mann-Whitney U teszt szignifikáns különbséget mutatott ($z=-2,56$, $p=0,0315$) a válaszok helyességben az 1a (medián=-0,025, $IQR=0,028$) és 1b kísérlet (medián=0,0, $IQR=0,044$) között.

A P1 és P2 kondíciók szintén egy tendenciózus változást mutattak ($t(66)=2,421$, $p=0,054$) a reakcióidőben az 1a (átlag=0,022, SD=0,032) és 1b kísérletekben (átlag=0,006, SD=0,021). A válaszok helyességének különbsége szignifikánsnak mutatkozott ($z=-2,33$, $p=0,039$) az 1a (medián=-0,025, IQR=0,052) és 1b kísérlet (medián=0,0, IQR=0,061) között. A P1 és S kondíciók nem mutattak különbséget.

2 kísérlet

A vegyes modell nem mutatott szignifikáns hatást a válaszok helyességében a vizsgált változókra (ismétlés: $\chi^2=1,949$, $df=1$, $p=0,163$; kondíció: $\chi^2=2,308$, $df=2$, $p=0,315$; interakció: $\chi^2=1,237$, $df=1$, $p=0,539$) csupán az ITI hatására ($\chi^2=14,936$, $df=1$, $p<0,001$).

A reakcióidőre illesztett modell szignifikáns hatásnak találta a kondíciót ($F(2,38030)=3,344$, $p=0,035$) és az interakciót a $\log(\text{ismétlés}) \times \text{kondíció}$ között ($F(2,38048)=4,303$, $p=0,014$) és az ITI-t ($F(1,38048)=407,456$, $p<0,001$). A *post hoc* analízisben a szignifikáns, kategorikus hatásokat vizsgáltuk meg. Az interakció lineáris trendjeit összehasonlítva, a P2 és S kondíciók meredeksége szignifikánsan különbözött ($z=2,856$, $p=0,012$), míg a P1 és P2 meredekségek tendenciát mutattak ($z=2,195$, $p=0,072$).

A következő lépésben az S és P2 kondíciók reakcióidő különbségének lefutását vizsgáltuk meg az ismétlés függvényében. Két regressziós modellt illesztettünk az ismétlés számhoz, az egyiket lineáris prediktor értékhez (A modell), a másikat egy log transzformált prediktorhoz (B modell). Mind az A ($R^2=0,005$, $F(1,1243)=6,926$, $p=0,012$), mind a B modell ($R^2=0,008$, $F(1,1243)=9,767$, $p=0,002$) szignifikanciát ért el. A két modell összehasonlításához az ún. encompassing tesztet használtuk. Az A modell szignifikánsnak mutatkozott ($F(-1,1242)=4,984$, $p=0,026$), míg a B modell nem ($F(-1,1242)=1,528$, $p=0,217$). Mivel a B modell nem érte el a szignifikanciát, annak illeszkedése jobbnak mondható, mint az A modellé, vagyis a reakcióidő különbsége inkább logaritmikus lefutást mutat.

EEG tanulmány

A résztvevők A értékének (átlag=0,6, SD=0,17) vizsgálata szignifikánsan különbözött a 0,5 véletlenszerű értéktől ($t(16)=2,44$, $p=0,0132$) az előtanulmány során. Ezen eredmények alapján az adaptált paradigmával EEG felvételt készítettünk.

Az EEG felvételekből nyert A' értékek átlaga szintén 0,5 felett volt (átlag=0,53, SD=0,18), de a szignifikanciát nem érte el ($t(28)=1,002$, $p=0,162$). Ezek az értékeket később felhasználtuk, hogy a résztvevőket két csoportra osszuk: az AC és C csoportra.

Először egy érdeklődési ablakot határoztunk meg a kondíciók, alanyok és csatornák mentén összeátlagolt trialek alapján. Az átlagolt adat megfigyelése alapján, meghatároztunk egy frekvencia-idő ablakot, a 40-70 Hz sávban, a stimulusbemutatás után 0,5-0,75 s között.

Az ablak meghatározása után megvizsgáltuk a neurális és viselkedéses adat kapcsolatát. Az ablakon belüli átlagteljesítmény pozitív korrelációt mutatott a résztvevők A' értékével ($n=29$, $r=0,371$, $p=0,048$).

Ezután összehasonlítottuk az AC és C csoportot, hogy megtudjuk mutatnak-e különbséget a viselkedéses eredmények alapján és ez milyen skalpi eloszlást mutat. A permutációs statisztika egy kiemelkedő clustert mutatott az ablak átlagteljesítményében, amely a bal frontoparietális régióban helyezkedett el ($t_{\text{sum}}=860,57$, $p=0,041$). Az AC csoport magasabb gamma teljesítményt mutatott (átlag=0,35 dB, SEM=0,07), mint a C csoport (átlag=0,08, SEM=0,05) populáció szinten.

A skalpi eloszlás meghatározása után megvizsgáltuk, hogy az aktivitás kondíció specifikus-e. A három kondíció (P1, P2, S) először minden résztvevő bevonásával vizsgáltuk, amely nem mutatott szignifikáns különbséget. Ezután a két csoportban külön-külön vizsgáltuk kondíciókra az aktivitást. A C csoport nem mutatott szignifikáns clustert. Az AC csoportban egy cluster emelkedett ki a bal frontoparietális régióban ($t_{\text{sum}}=681,3$, $p=0,021$) a P1 és S kondíciót összehasonlítva.

Az utolsó lépésként megvizsgáltuk a gamma aktivitás fáziskapcsoltságát a stimulus-prezentációhoz. Egy ITPC analízist végeztünk az AC csoport P1 kondíciójában, ahol az érdeklődési ablakot egy prestimulus ablakhoz (-0,4—0,15 s, 40-70 Hz) hasonlítottuk. Az AC csoport ITPC értéke (medián=0,07, IQR=0,005) nem mutatott szignifikáns különbséget ($n=14$ $z=-0,282$, $p=0,78$) a prestimulus ablakhoz (medián=0,068, IQR=0,005) képest.

Megbeszélés

Viselkedéses tanulmány

A bemutatott tanulmány célja a felügyelet-nélküli vizuális statisztikai tanulás várakozási és priming hatásának megfigyelése volt. Az 1a kísérletben egy korábban publikált tanulmány módosított paradigmáját használtuk és sikeresen replikáltuk az eredményeiket, melyben csökkent reakcióidőt és magasabb arányú helyes válaszokat tapasztaltak az időben asszociált stimuluspárok megjósolható tagjaira, ami a priming hatást tükrözi. A várakozási hatást nem tudtuk kimutatni.

Mivel az 1a kísérlet csak kategória-váltó párokat tartalmazott, a képtranszíciók nagyobb aránya szintén kategória-váltó volt. Ezen felül a kategóriaismétlés és így a megtanult motoros információ megszegése csak a P1 és S kondíció esetén fordulhatott elő. Ez a váratlan szabályszegés a reakcióidő növekedéséhez vezethet, ami tovább növeli a reakcióidő különbséget a kategória-váltó és -ismétlő átmenetek között. Ezen információ elsajátítása szintén az implicit tanulás kategóriájába esik, de az elsajátított információ így inkább motoros, mint vizuális modalitású. A párhuzamos kategorizációs és a motoros válaszok torzították a kísérlet eredményét, melyet az újra elemzés és az 1b kísérlet is bizonyított. Ebben a kísérletben csökkentettük a motoros mintázatot a kategória-ismétlő párok bevezetésével és egy jelentős hatáscsökkenést tapasztaltunk a priming hatásban annak ellenére, hogy a statisztikai információ változatlan maradt a szekvenciában.

Ezután célunknak tűztük ki egy olyan paradigma létrehozását, amelyben a motoros komponensek nélkül tudjuk megfigyelni a vizuális statisztikai tanulás hatását. Ehhez megemeltük a résztvevők számát és az ingerbemutatók számát. Megváltoztattuk a kategorizációs feladatot. A reakcióidőben tapasztalható kezdeti magas variancia miatt egy bevezető, random periódust szűrtünk a szekvencia elé. A monotonitás csökkentésére pedig változó ITI-t alkalmaztunk. A módosított paradigma alkalmasnak tűnt a statisztikai tanulás viselkedéses aspektusainak megfigyelésére, amit a kondícióspecifikus reakcióidőváltozás indikált és sikeresen leírtuk a tanulás görbéjét.

A reakcióidő elemzése a 2 kísérletben a priming hatás kiemelkedését mutatta a lineáris trendekben. Ezen felül, a tanulás görbéje logaritmusos lefutást mutatott, ami a tanulási hatást gyors kialakulását indikálja a viszonylag alacsony ingerismétlés mellett más tanulmányokhoz hasonlítva.

EEG tanulmány

Habár a familiaritás teszt eredménye nem hozott szignifikáns eredményt, az előmérés eredménye bizonyítékkal szolgált a paradigma működéséről. A viselkedéses eredmény hiánya ellenére az elektrofiziológia eredményeket nem hagyhatjuk figyelmen kívül, hiszen a felügyelet nélküli statisztikai tanulás implicit hálózatok alkalmaz, míg a familiaritás teszthez explicit tudásra van szükség.

Az EEG eredmények magukban foglalnak egy magas frekvenciájú oszcillációt a ingerbemutató után 0,5-0,75 s-mal, ami nem fáziskapcsolatlan jelent meg. Ez az aktivitás továbbá pozitív korrelációt mutatott a viselkedéses eredményekkel és a skalp frontoparietális területén jelent meg. A gamma aktivitás frekvencia, idő- és térbeli eloszlása arra enged következtetni, hogy ez a kondícióspecifikus oszcillátoros változás a modell-alapú tanulás korrelátuma, amelyet a modell-nélküli és modell-alapú tanulási elmélet ír le. Az inger vezérelt modell-nélküli tanulás felelős a környezeti ingermintázatok és szabályszerűségek kinyeréséért és elsajátításáért. Az elmélet szerint, ez egy olyan funkció, amely *bottom-up* folyamatokat használ, így a kéreg posterior régiójához kötött. Ezzel párhuzamosan, a modell-alapú tanulás egy *top-down* folyamat, amely a korábban összegyűjtött információ segítségével egy belső modellt épít a környezetünkről. Ezután a létrehozott modell segítségével a kortikális funkciók optimalizálásán keresztül jobb teljesítményt tud elérni a feldolgozásban és összeségében egy cél-orientált viselkedést hoz létre. Ezeket a folyamatokat az anterior területekhez kapcsolják, mint például a dorsolaterális prefrontális cortex. Habár a megfigyelés értékes, de nem segít bennünket hozzá a folyamat teljes megértéséhez. A frontális gamma aktivitást az explicit tudáshoz és modell alapú tanuláshoz kötése nem magyarázza a statisztikai tanulásban tapasztalható magas varianciát a modell-alapú tanulás definíciójából eredendően. Számos kognitív funkciót magában foglal (pl.: figyelem, memóriefunkciók, döntéshozatal), így nem ad egyértelmű választ. A figyelem egy megalapozott jelölt lehet, amely magyarázni tudja a tapasztalt különbségeket. A figyelembe és figyelmen kívül eső ingerekhez tartozó teljesítmény változását már korábban leírták statisztikai tanulás paradigmában, ahol a figyelembe eső ingerekre nagymértékben növekedett a teljesítmény. A figyelem emellett esszenciális az explicit memóriák létrejöttéhez, amit pedig a familiaritás teszt kíván meg.

Jövőbeni terveink közt szerepel a gammasáv módszeres elemzése és forrásának lokalizálása, valamint megfigyelni pontosan milyen folyamaton keresztül modulálja a statisztikai tanulást. Ezen alkotóelem azonosítása hozzásegíthet bennünket a neurológiai háttér, valamint tanulás percepcióban betöltött szerepének megértéséhez.

Konklúzió

A bemutatott tanulmányokban megvizsgáltuk az időben asszociált vizuális stimulusok felügyelet nélküli elsajátításnak viselkedéses és kérgi bizonyítékait. Egy korábban publikált elrendezést adaptáltunk, amely ingerpárokat alkalmaz és felvettük a résztvevők válaszait és reakció idejét. Reprodukáltuk a korábbi tanulmány eredményeit és megfigyeltük, hogy a megjósolható stimulusok alacsonyabb reakcióidővel és magasabb arányú helyes válaszokkal társultak. Ezután módosítottuk a paradigmát, hogy elimináljunk egy feltételezett motoros mintázatot. A módosított kísérleti elrendezés ugyanazzal a statisztikai információval, de kisebb motoros mintázattal kisebb hatást eredményezett. Az 1a és 1b kísérlet, valamint azok összehasonlítása alapján megállapítottuk, hogy az eredeti tanulmány nem hűen tükrözi a statisztikai tanulást. Ez miatt a következő lépésben célunkként a paradigma módosítását tűztük ki, hogy megfigyelhető tanulási hatást kapjunk. Az új elrendezésben a reakcióidő csökkenését és egy negatív trendet tapasztaltunk megjósolható képek esetén ezúttal motoros mintázat nélkül. Ezen felül jellemeztük a tanulás görbáját a reakcióidő különbségek alapján, amely egy logaritmikus lefutást mutatott.

A viselkedéses eredmények után, a tanuláshoz kapcsolódó kérgi aktivitás megfigyelése lett a célunk. A paradigmát tovább módosítottuk, hogy alkalmas legyen EEG felvétel készítésére. Az adatok alapján meghatároztunk egy idősor ablakot a gamma sávban (40-70 Hz) 0,5-0,75 s-mal a stimulus-bemutató után. Az ablak átlagos teljesítménye pozitív korrelációt mutatott a viselkedéses eredményekkel. Ez a gamma aktivitás a nagy kiterjedésben a frontoparietális területen jelent meg, számottevően a frontális area felett.

A gamma aktivitás tér és időbeli eloszlása nagy hasonlóságot mutat a modell-alapú tanulással. Ezek a kérgi folyamatok *top-down* mechanizmusként vannak leírva, amelyek befolyásolják a figyelmünket, döntéshozatalunkat és összeségében egy cél-orientált viselkedést hoznak létre. Ezek az aktivitások egy nagyobb kérgi hálózat, a frontoparietális hálózat részei. Korábbi eredmények alapján elmondhatjuk, hogy a hálózat hátsó aktivitásai az inger vezérelt, *bottom-up* folyamatokért felelnek, amelyek hozzájárulnak a környezeti információk implicit elsajátításához. Az anterior területek a cél-orientált, *top-down* viselkedésben játszanak szerepet, amelyek a kognitív folyamatokat befolyásolják korábban elsajátított információk alapján.

Köszönetnyilvánítás

Először szeretném megköszönni Prof. Dr. Bari Ferencnek és Prof. Dr. Jancsó Gábornak a felvételemet az Elméleti Orvostudományok Doktori Iskola Idegtudomány alprogramjába. Ezen felül szeretném megköszönni Prof. Dr. Sály Gyulának, hogy csatlakozhattam az Élettani Intézethez és a laborjához. Szeretném hálámat kifejezni Dr. Kaposvári Péternek, a témavezetőmnek a közös munkáért, valamint a laborunk további tagjainak Dr. Fehér Ágnesnek és Dr. Benyhe Andrásnak a sok segítségért. Köszönettel tartozom továbbá az Élettani Intézet összes munkatársának is. Végezetül szeretném megköszönni a családomnak és barátaimnak a szeretetüket és támogatásukat.