

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem

Kognitív Tudományi Tanszék

Pszichológia Doktori Iskola



M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

Neszmélyi Bence

**A SZENZOROS ÉS MOTOROS RENDSZER KÖZTI
INTERAKCIÓK HATÁSA A SAJÁT CSELEKVÉS ÁLTAL
GENERÁLT HANGOK PRODUKCIÓJÁRA ÉS
FELDOLGOZÁSÁRA**

PhD téziszfüzet

Témavezető: Dr. Horváth János

Budapest, 2019

A kutatások háttere és a disszertáció célja

A cselekvések szenzoros következményei fontos szerepet töltenek be a motoros kontrollfolyamatokban: Gyakran ők számítanak a cselekvések céljának, és így ösztönözhetik a cselekvések elindítását (Hommel, 2009; Hommel, Müsseler, Aschersleben, & Prinz, 2001). Emellett visszajelzést is adnak a cselekvés kivitelezéséről: jelzik, ha korrekcióra van szükség, mert a mozgás kitért az előre meghatározott pályáról (Adams, 1971, 1976). Ezek fényében nem meglepő, hogy a jelenleg elterjedt motoros kontroll-elméletek többnyire nagy hangsúlyt helyeznek a szenzoros effektusok jelentőségére. (Hommel, 2009; Todorov, 2004; Wolpert, Diedrichsen, & Flanagan, 2011). Azonban számos megközelítés csak bizonyos cselekvéstípusok esetében számol szenzoros effektusokra épülő kontrollfolyamatokkal: A ballisztikus mozgások (ilyen például, mikor suhintunk egyet a teniszütővel, vagy mikor leütjük a zongora valamelyik billentyűjét) végrehajtása annyira gyors, hogy mire a visszajelzés feldolgozása elkezdődhetne, a mozdulat már be is fejeződött (Chernikoff & Taylor, 1952; Lashey, 1951; Schmidt & Wrisberg, 2000). Ennek folyományaként széles körben elterjedt az az elképzelés, hogy az ilyen típusú mozdulatok kivitelezésére nincsenek hatással a szenzoros effektusok (Finney, 1997; Gates, Bradshaw, & Nettleton, 1974; Pfordresher & Palmer, 2002, 2006). A cselekvésnek a szenzoros feldolgozásra gyakorolt hatását vizsgáló kutatások jellemzően ezt a szemléletet követik: Hajlamosak megfeledkezni az ellentétes hatás lehetőségéről, arról, hogy a hangok is befolyással lehetnek az őket kiváltó mozdulatokra (Horváth, 2015).

A disszertációban ennek az elképzelésnek—mely szerint a cselekvések szenzoros következményei nem relevánsak a motoros kontrollfolyamatok szempontjából—a létjogosultságát vizsgáltam meg. A vizsgálatok kiindulópontjaként egy olyan paradigma

szolgált, melyet a cselekvésfüggő EKP (*eseményhez kötött potenciál*) elnyomás jelenségének vizsgálatára szoktak használni (Baess, Horváth, Jacobsen, & Schröger, 2011; SanMiguel, Todd, & Schröger, 2013; Schäfer & Marcus, 1973). Ebben a paradigmában ballisztikus mozgásokkal (pl. gombnyomással, kopogással) kell hangot kiváltani, hogy össze lehessen hasonlítani a cselekvések által kiváltott és más, külső forrásból származó hallási ingerek feldolgozását. A paradigma egyik alapfeltevése, hogy a kiváltott hangok nem befolyásolják a cselekvések kivitelezését. Bár valóban irreális, hogy a kísérletek során használt ballisztikus cselekvéseket a szenzoros visszajelzésre támaszkodva menet közben, „online” korrigáljuk, szekvenciális cselekvések esetében (amikor ugyanazt a mozdulatot sokszor kell megismételni) a visszacsatolás „offline” hasznosítása nem zárható ki. Például a motoros parancs módosítható két mozdulat szünetében a korábbi cselekvések eredményének figyelembevételével (Wolpert, 1997), de a mozgás eredményével kapcsolatos előrejelzések, várakozások hatással lehetnek a mozdulat tervezésére is (Hommel, 2009). A disszertációban bemutatott négy tanulmány ezeknek a motoros kontrollfolyamatoknak a feltételeit és lehetséges következményeit vizsgálta.

Olyan kísérletekben, melyekben hangok generálása a feladat, többnyire széles körben elterjedt eszközöket, mint például gombokat, vagy játék kontrollereket szoktak használni az ingerek kiváltására. Mi a négy vizsgálatunk során egy nyomásérzékeny ellenállást (FSR szenzor) használtunk erre a célra: A kísérleti személyeknek ezt kellett— a feladat függvényében—összeecsipenteni, megnyomni, vagy megkopogtatni, ahhoz, hogy a hangok megszólaljanak. Ez az eszköz lehetővé tette, hogy rögzítsük a vizsgálati személyek mozdulatainak a fizikai paramétereit (a cselekvés során gyakorolt erő változását az idő függvényében). A kísérleteink során azt figyeltük meg, hogy a szenzoros

effektusok jelentős hatást gyakorolnak a mozgásos paraméterekre: A vizsgálatok résztvevői a cselekvések erejének optimalizálására használták a kiváltott hangokat. A disszertáció erre a jelenségre fókuszál (ezt *effektusfüggő motoros adaptációnak* neveztünk el): az erő-optimalizáció jelenségét arra használtuk, hogy feltárjuk a szenzoros effektusoknak a ballisztikus cselekvések irányításában betöltött szerepét.

Az *első tanulmányban* egy hagyományos EKP elnyomási paradigmát alkalmaztunk. A vizsgálatnak az volt az új eleme, hogy az EEG-felvétellel párhuzamosan rögzítettük a cselekvések paramétereit is. A célunk az volt, hogy eldöntsük, valóban nem különböznek-e egymástól a hangot kiváltó és a „csöndes” cselekvések. Emellett azt is megvizsgáltuk, hogy a motoros kontrollfolyamatok figyelmen kívül hagyása nem viszi-e tévútra a paradigmával vizsgált EKP-effektusok értelmezését. A *második tanulmány* során különféle eszközökkel illetve mozdulatokkal kellett a résztvevőknek hangokat generálniuk, és arra voltunk kíváncsiak, hogy különböző mozdulattípusok esetében is megfigyelhető-e az effektusfüggő motoros adaptáció. A *harmadik tanulmány* az effektusfüggő motoros adaptáció idői korlátait vizsgálta. Végezetül a *negyedik tanulmány* a cselekvés-következmény kontingencia manipulációjára támaszkodva azt próbálta feltárni, hogy milyen hatással lehet a hallási kontextus az effektusfüggő motoros adaptációra.

Új tudományos eredmények

I. Tézispont: A cselekvés által kiváltott hangingerek szerepe a ballisztikus mozgások irányításában: Az effektusfüggő motoros adaptáció

A cselekvés hallási feldolgozásra gyakorolt hatását vizsgáló kutatásokban a résztvevőknek gyakran kell gyors, ballisztikus mozdulatokkal hangingereket generálniuk. Ezeknek a kísérleti paradigmáknak az egyik alapfeltevése, hogy a cselekvések kivitelezését nem befolyásolja a kiváltott inger vagy annak hiánya: a mozdulatok mindig ugyanazon előre megtervezett parancs alapján kerülnek kivitelezésre (Horváth, 2015). Ezt a feltételezést a mozgási paraméterek vizsgálatával teszteltük. A résztvevők egy nyomásérzékeny ellenállást nyomtak meg időről-időre. Ezek a cselekvések az egyik feltételben egy hang megszólalását eredményezték, míg egy másik feltételben nem jártak együtt külső szenzoros effektusokkal. A cselekvések adatai az EEG-jellel párhuzamosan kerültek rögzítésre. Az eszköz megnyomásakor kifejtett erő értékeit összehasonlítottuk a hangot kiváltó, illetve a csendes gombnyomások esetében. A mozdulatok kivitelezéséhez kapcsolódó EKP komponenseket is megvizsgáltuk, hogy feltárjuk az effektusfüggő kontrollfolyamatokhoz kapcsolódó hatásokat a mozdulatok elektrofiziológiai korrelátumaiban, illetve, hogy megvizsgáljuk, hogy a motoros folyamatokhoz kapcsolódó hatások hozzájárulhatnak-e az EKP amplitúdók csökkenéséhez. Ez utóbbi jelenség gyakran megfigyelhető a saját cselekvések által kiváltott ingerek esetében.

Az eredmények azt mutatták, hogy a hangot kiváltó cselekvések kivitelezésekor a résztvevők kisebb erőt fejtettek ki, mint amikor a cselekvés nem járt hallási következménnyel. Ez azt sugallhatja, hogy a résztvevők a hangokat az őket kiváltó cselekvések optimalizálására használták. Ez ellentmond a paradigma eredeti feltevésének, és azt jelzi, hogy a hangok nem irrelevánsak a motoros kontrollfolyamatok

szempontjából, hanem számottevő szerepet játszanak a cselekvések irányításában. A motoros potenciáloknak a cselekvésindítást megelőző, és a cselekvésindítást követő komponenseiben is találtunk olyan különbségeket, melyek az effektusfüggő kontrollfolyamatok hatását tükrözhetik. A cselekvésfüggő N1 elnyomás időszávjában megfigyelt különbség pedig arra utalhat, hogy a motoros tényezők a korábban prediktív folyamatokkal magyarázott EKP-elnyomásban (Hughes, Desantis, & Waszak, 2013) is szerepet játszhatnak.

II Tézispont: Effektusfüggő motoros adaptáció mindennapi eszközök használata során

Az első tanulmány azt mutatta, hogy a résztvevők a hangingereket kiváltó cselekvéseket kisebb erővel hajtották végre, mint azokat a mozdulatokat, melyekhez nem társult hallási következmény. Az eredmények azt sugallják, hogy ha megváltoztatjuk a cselekvéshez kapcsolódó szenzoros ingerek készletét, az közvetlen hatással lehet a motoros tervezési és kontrollfolyamatokra. A második tanulmányban azt vizsgáltuk, hogy ez a megfigyelés csak az első kísérletnél használt eszközre és mozgásra érvényes, vagy általánosítható a cselekvések szélesebb körére. Három kísérlet során a résztvevők különböző, a mindennapi eszközhasználatra jellemző cselekvéseket hajtottak végre: össze kellett csippenteniük a nyomásérzékeny ellenállást, egy gombot nyomtak, vagy az asztalon kellett kopogniuk az ujjukkal. Mindegyik cselekvéstípust végrehajtották hanggal, illetve anélkül is.

Az eredmények alátámasztották az előző vizsgálat megfigyeléseit: A résztvevők kisebb erőt fejtettek ki, amikor a cselekvéseket hangok generálásra használták, mint abban a feltételben, amikor a mozdulatok nem jártak együtt hangingerekkel. Ez a mintázat

mindhárom cselekvéstípus esetében megfigyelhető volt, ami azt mutatja, hogy a hangingerek abban az esetben is hozzájárulhatnak a cselekvések irányításához, ha a proximális (taktilis) visszajelzés önmagában is megbízható visszajelzést ad a cselekvések kivitelezéséről. Ez az megfigyelés egybevág korábbi, eszközhasználattal kapcsolatos kutatások eredményeivel, melyek azt mutatják, hogy amennyiben több információforrás áll rendelkezésre, a motoros kontrollfolyamatok elsősorban a disztális (hallási, vizuális) ingerekre támaszkodnak (Kunde, Müsseler, & Heuer, 2007; Ladwig, Sutter & Müsseler, 2012).

III. Tézispont: Az effektusfüggő motoros adaptáció idői korlátai

Az első két kutatás alapján kijelenthető, hogy a cselekvés hallási következményei felhasználhatóak a hangot kiváltó mozdulatok optimalizálására. A harmadik tanulmány a motoros adaptáció idői korlátainak megismerésére irányult: Azt vizsgáltuk, hogy akkor is lehetséges-e az erő optimalizálására használni a cselekvések következményeit, ha késleltetést iktatunk a cselekvés és az általa kiváltott inger közé. Az előző vizsgálatokhoz hasonlóan a résztvevők egy nyomásérzékeny ellenállás segítségével generáltak hangingereket. A cselekvés és hang közti késleltetés blokkonként változott: Két kísérlettel a 0 – 1600 ms-ig terjedő időtartományt fedtük le.

Az eredmények azt mutatták, hogy csak egy viszonylag rövid, körülbelül 200 ms-os idői ablakon belül tudjuk a cselekvés hallási következményeit a ballisztikus cselekvések irányítására felhasználni. Ha ennél nagyobb volt az idői távolság a cselekvés és a kiváltott hang között, a mozdulatok során kifejtett erő nem különbözött a hang nélküli cselekvések erejétől. Ez arra utalhat, hogy az oksági kapcsolat felismerése (Buehner & McGregor, 2009; Shanks, Pearson, & Dickinson, 1989) nem elégséges feltétele az

effektusfüggő motoros adaptációnak, a következmények hatékony felhasználásához feltehetőleg a motoros és szenzoros esemény automatikus integrációjára van szükség (Hommel, 2004).

Egy harmadik kísérlet a fenti eredményeket tovább árnyalta, megmutatva, hogy az integrációs ablak nem merev korlátot jelent, hiszen a késleltetett effektusok felhasználása tapasztalat hatására hatékonyabbá válhat. Azok a résztvevők, akik hosszú késleltetésekhez (400 ms) adaptálódtak, később jobban tudták erő-optimalizálásra használni a közepes késleltetésű (200-ms) hangingereket, mint azok, akik közel egyidejű cselekvés-következmény kapcsolatokhoz szoktak hozzá. Ezt az adaptációs jelenséget magyarázhatja, hogy a cselekvés-következmény kapcsolat idői tényezőjének észlelése módosulhat késleltetett effektusokkal való tapasztalat hatására. (Cao, Veniero, Thut, & Gross, 2017; Elijah, Pelley, & Whitford, 2016).

IV. Tézispont: A hallási kontextus hatása az effektusfüggő motoros adaptációra

Az első három tanulmány azt mutatta meg, hogy a ballisztikus cselekvések irányítását jelentős mértékben befolyásolhatja, ha a cselekvés és következménye közti kapcsolat sérül (pl. ha elhagyjuk, vagy késleltetjük a hallási effektust). A negyedik tanulmány olyan szituációban vizsgálta az effektusfüggő motoros adaptációt, ahol a fizikai cselekvés-következmény kapcsolat érintetlen maradt, de a hallási környezet manipulációja a visszajelzés minőségének romlását eredményezte. A résztvevők ebben a vizsgálatban is a nyomásérzékeny ellenállás megnyomásával váltottak ki hangokat. Az egyik kísérleti feltételben a hallási következmények teljes mértékben a résztvevő cselekvéseitől fügtek. Egy másik feltételben azonban a cselekvés-következmény kontingenciát csökkentettük azáltal, hogy a számítógép által véletlenszerű időpontokban

generált hangok voltak a résztvevő által kiváltott ingerek közé keverve. Az első kísérletben a gép és a résztvevő által generált ingerek egyformák voltak. A második kísérletben manipuláltuk a hangok frekvenciáját: Némely kísérleti blokkban a résztvevő által generált és a gép által kiváltott hangok egyformák voltak, más blokkokban azonban jól megkülönböztethető frekvenciával rendelkeztek.

A résztvevők nagyobb erővel hajtották végre a cselekvéseket abban az esetben, ha külső hangok voltak keverve a saját cselekvéseik által kiváltott ingerek közé. A külső hangok hatása különösen hangsúlyos volt abban az esetben, ha akusztikai jellemzőik alapján nem lehetett őket megkülönböztetni a résztvevő által kiváltott ingerektől. Az eredmények azt mutatják, hogy még ha nem is sérül a fizikai kapcsolat a cselekvés és annak következménye között, környezeti tényezők jelentős hatással lehetnek az effektusfüggő motoros adaptációra. A visszajelzés minőségének kontextus által okozott csökkenése a különböző cselekvési stratégiák súlyozásának újralibrálásához vezethet, és előtérbe kerülhetnek olyan stratégiák, melyek az energiabefektetés minimalizálása helyett olyan tényezőkre helyezik a hangsúlyt, amik a cselekvések erejének megnövekedésével járhatnak együtt (pl. a taktilis visszajelzés maximalizálása, vagy a sikeres cselekvések esélyének megnövelése).

Összegzés

A négy tanulmány számos bizonyítékkal szolgál arra vonatkozóan, hogy a hallási effektusok jelentős szerepet töltenek be a motoros kontrollfolyamatokban. Az eredmények azt mutatják, hogy a saját cselekvés által kiváltott hangokat a motoros rendszer felhasználja az ingereket kiváltó cselekvések optimalizálására, még akkor is, ha gyors ballisztikus cselekvésekről van szó, melyek esetében nem reális az online

cselekvéskorrekció lehetősége. Mivel a résztvevők cselekvés-szekvenciákat hajtottak végre (azaz sokszor ismételték ugyanazt a mozdulatot), a kísérletekben megfigyelt erő-optimalizáció feltehetően egy lépcsőzetes korrekción alapul, melynek során a résztvevők próbáról próbára csökkentették a cselekvések erejét egy optimális szint eléréséig. A cselekvésfüggő motoros adaptáció tehát tekinthető egy energia-minimalizálási folyamatnak (Hatze, & Buys, 1977), melynek során a résztvevők a hallási ingerek által biztosított visszajelzést használják fel arra, hogy lecsökkentsék a cselekvések irányítására és kivitelezésére fordított energiát úgy, hogy közben biztosítják azt is, hogy magas maradjon a sikeres cselekvések kivitelezésének esélye. Emellett egyéb mechanizmusok is szerepet játszhatnak az erő optimalizálásában. Azok a hallási események, melyek a cselekvésekhez kapcsolódnak, egyértelműbb célt jelenthetnek a mozdulatok számára, mint a cselekvéssel együtt járó, kevésbé konkrét proximális (pl. taktilis) ingerek, ami az ideomotoros elmélet szerint hatékonyabb motoros tervezési folyamatokhoz járulhat hozzá (Hommel et al., 2001).

A kísérletekben használt eszköz esetében a kiváltott pittyenő hangok csak minimális visszajelzést szolgáltattak a mozdulatokról: A hang megjelenése mindössze annyit jelzett, hogy a cselekvés sikeres volt. (Szemben például egy beszédhanggal, ami az artikuláció több aspektusáról is tud egyszerre információt szolgáltatni.) Azonban az eredmények azt mutatják, hogy ez a korlátozott információ is felhasználható a motoros folyamatok optimalizálására.

Noha az eddig leírtak arra is utalhatnának, hogy az effektusfüggő motoros adaptáció egy stratégiai folyamat, mely a cselekvés és következmény közötti oksági viszony észlelésén alapszik, az eredményeink ezt megkérdőjelezzik. A cselekvés-optimalizálás harmadik tanulmányban leírt idői korlátai jóval szigorúbbak a kauzális

kapcsolat észlelésének idői feltételeinél (Buehner & McGregor, 2009; Shanks et al., 1989), így elképzelhető, hogy asszociatív tanulási mechanizmusok helyett valamilyen automatikus cselekvés-következmény integráció áll a jelenség hátterében (Hommel, 2004). Erre utal az optimalizálási folyamat gyors lefutása is: 5-10 próba után az adatokban már jól látható volt a hangot kiváltó cselekvések erejének csökkenése.

A ballisztikus cselekvések motoros kontrollfolyamataival kapcsolatos elméleti felismeréseken túl a disszertációban közölt tanulmányoknak módszertani és gyakorlati jelentősége is lehet: Az effektusfüggő motoros adaptáció jelensége azt mutatja, hogy a cselekvésfüggő hallási EKP csökkenési paradigma egyik alapfelvetése (ti. a ballisztikus mozdulatok függetlensége a hallási effektusoktól) valószínűleg nem állja meg a helyét, és az ezen alapuló eljárások felülvizsgálata is szükséges lehet. A harmadik és negyedik tanulmányban közölt eredmények (késleltetés és kontextus hatása) pedig digitális eszközök tervezéséhez nyújthatnak új nézőpontokat: A hallási környezet változásainak a mozgásos paraméterekben való tükröződése például adaptív interakciós eszközök tervezéséhez járulhat hozzá. A disszertációban tárgyalt vizsgálatok tehát számos új kérdést vetnek fel, amelyek mind elméleti, mind gyakorlati irányban további kutatások kiinduló pontjául szolgálhatnak.

A tézispontokhoz kapcsolódó publikációk listája

- I. Neszmélyi, B., Horváth, J. (2017). Consequences matter: self-induced tones are used as feedback to optimize tone-eliciting actions. *Psychophysiology* 54(6), 904-915. <http://dx.doi.org/10.1111/psyp.12845>
- II. Horváth, J., Bíró, B., & Neszmélyi, B. (2018). Action-effect related motor adaptation in interaction with everyday devices. *Scientific Reports*, 8, 6592. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-25161-w>
- III. Neszmélyi, B., & Horváth, J. (2018). Temporal constraints in the use of auditory action effects for motor optimization. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 44(11), 1815-1829. <http://dx.doi.org/10.1037/xhp0000571>
- IV. Neszmélyi, B., & Horváth, J. (2019). The role of auditory context in action-effect-related motor adaptation. *Human Movement Science*, 67, 102503. <https://doi.org/10.1016/j.humov.2019.102503>

Felhasznált irodalom

- Adams, J. A. (1971). A Closed-loop theory of motor learning. *Journal of Motor Behavior*, 3(2), 111–150. <https://doi.org/10.1080/00222895.1971.10734898>
- Adams, J. A. (1976). Issues for a closed loop theory of motor learning. In: G. E. Stelmach (Ed.), *Motor control, issues and trends* (pp. 87-107). New York: Academic press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-665950-4.50009-2>
- Baess, P., Horváth, J., Jacobsen, T., & Schröger, E. (2011). Selective suppression of self-initiated sounds in an auditory stream: An ERP study. *Psychophysiology*, 48(9), 1276–1283. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1469-8986.2011.01196.x>
- Buehner, M. J., McGregor, S. J. (2009). Contingency and contiguity trade-offs in causal induction. *International Journal of Comparative Psychology*, 22(1), 19-42.
- Cao, L., Veniero, D., Thut, G., & Gross, J. (2017). Role of the cerebellum in adaptation to delayed action effects. *Current Biology*, 27(16), 2442-2451. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cub.2017.06.074>
- Chernikoff, R., & Taylor, F. V. (1952). Reaction time to kinaesthetic stimulation resulting from sudden arm displacement. *Journal of Experimental Psychology*, 43(1), 1–8. <http://dx.doi.org/10.1037/h0056952>
- Elijah, R. B., Le Pelley, M. E., & Whitford, T. J. (2016). Modifying temporal expectations: Changing cortical responsivity to delayed self-initiated sensations with training. *Biological Psychology*, 120, 88–95. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biopsycho.2016.09.001>
- Finney, S. A. (1997). Auditory feedback and musical keyboard performance. *Music Perception*, 15(2), 153--174. <https://doi.org/10.2307/40285747>
- Gates, A., Bradshaw, J. L., & Nettleton, N. C. (1974). Effect of different delayed auditory feedback intervals on a music performance task. *Perception & Psychophysics*, 15(1), 21–25. <https://doi.org/10.3758/BF03205822>

- Haggard, P., Clark, S. (2003). Intentional action: Conscious experience and neural prediction. *Consciousness and Cognition*, 12(4), 695–707.
[https://doi.org/10.1016/S1053-8100\(03\)00052-7](https://doi.org/10.1016/S1053-8100(03)00052-7)
- Haggard, P., Clark, S. & Kalogeras, J. (2002). Voluntary action and conscious awareness. *Nature Neuroscience*, 5, 382–385. <https://doi.org/10.1038/nn827>
- Hatze, H., & Buys, J. D. (1977). Energy-optimal controls in the mammalian neuromuscular system. *Biological Cybernetics*, 27(1), 9–20.
<https://doi.org/10.1007/BF00357705>
- Hommel, B. (2004). Event files: feature binding in and across perception and action. *Trends in Cognitive Sciences*, 8(11), 494–500.
<https://doi.org/10.1016/j.tics.2004.08.007>
- Hommel, B. (2009). Action control according to TEC (theory of event coding). *Psychological Research*, 73(4), 512–526. <https://doi.org/10.1007/s00426-009-0234-2>
- Hommel B., Müsseler J., Aschersleben G., & Prinz W. (2001). The theory of event coding (TEC): a framework for perception and action planning. *Behavioral and Brain Sciences*, 24(5), 849–878. <https://doi.org/10.1017/S0140525X01000103>
- Horváth, J. (2015). Action-related auditory ERP attenuation: Paradigms and hypotheses. *Brain Research*, 1626, 54–65. <https://doi.org/10.1016/j.brainres.2015.03.038>
- Hughes, G., Desantis, A., & Waszak, F. (2013). Mechanisms of intentional binding and sensory attenuation: The role of temporal prediction, temporal control, identity prediction, and motor prediction. *Psychological Bulletin*, 139(1), 133–151.
<https://doi.org/10.1037/a0028566>
- Kunde, W., Müsseler, J., & Heuer, H. (2007). Spatial compatibility effects with tool use. *Human Factors*, 49(4), 661–670. <https://doi.org/10.1518/001872007X215737>
- Ladwig, S., Sutter, C., & Müsseler, J. (2012). Crosstalk between proximal and distal action effects when using a tool. *Zeitschrift für Psychologie*, 220(1), 10–15.
<https://doi.org/10.1027/2151-2604/a000085>

- Lashley, K. S. (1951). The problem of serial order in behavior. In L. A. Jeffress (Ed.), *Cerebral mechanisms in behavior* (pp. 112-136). New York: Wiley.
- Pfordresher, P. Q., & Palmer, C. (2002). Effects of delayed auditory feedback on timing of music performance. *Psychological Research, 66*, 71-79.
<http://dx.doi.org/0.1007/s004260100075>
- Pfordresher, P. Q., & Palmer, C. (2006). Effects of hearing the past, present, or future during music performance. *Perception & Psychophysics, 68*(3), 362–376.
<https://doi.org/10.3758/BF03193683>
- SanMiguel, I., Todd, J., & Schröger, E. (2013). Sensory suppression effects to self-initiated sounds reflect the attenuation of the unspecific N1 component of the auditory ERP. *Psychophysiology, 50*(4), 334–343.
<http://dx.doi.org/10.1111/psyp.12024>
- Schäfer, E. W., & Marcus, M. M. (1973). Self-stimulation alters human sensory brain responses. *Science, 181*(4095), 175–177.
<http://dx.doi.org/10.1126/science.181.4095.175>
- Schmidt, R. A., & Wrisberg, C. A. (2000). *Motor learning and performance. A problem-based learning approach*. Champaign: Human Kinetics.
- Shanks, D. R., Pearson, S. M., & Dickinson, A. (1989). Temporal contiguity and the judgment of causality by human subjects. *Quarterly Journal of Experimental Psychology, 41B*, 139–159. <http://dx.doi.org/10.1080/14640748908401189>
- Todorov, E. (2004). Optimality principles in sensorimotor control. *Nature Neuroscience, 7*(9), 907–915. <https://doi.org/10.1038/nn1309>
- Wolpert, M. (1997). Computational approaches to control. *Trends in Cognitive Sciences, 1*(6), 209-216. [https://doi.org/10.1016/S1364-6613\(97\)01070-X](https://doi.org/10.1016/S1364-6613(97)01070-X)
- Wolpert, D. M., Diedrichsen, J., & Flanagan, J. R. (2011). Principles of sensorimotor learning. *Nature Reviews Neuroscience, 12*(12), 239-251.
<https://doi.org/10.1038/nrn3112>