

Il ruolo del ragionamento e dell'elaborazione semantica nell'uso di utensili: la prospettiva integrata dell'*action reappraisal*

The role of reasoning and semantic processing in tool use: the integrated perspective of action reappraisal

Giovanni Federico ^{1,2,3}, Maria Antonella Brandimonte ¹

¹ Laboratorio di Psicologia Sperimentale, Università Suor Orsola Benincasa, Napoli, Italia.

² IRCCS Synlab SDN, Napoli, Italia.

³ Laboratoire d'Étude des Mécanismes Cognitifs, Université Lumière Lyon 2, Lyon, Francia.

Autore responsabile per la corrispondenza: Giovanni Federico, Laboratorio di Psicologia Sperimentale, Università Suor Orsola Benincasa, Napoli. E-mail: research@giovanfederico.net

Inviato: 02/12/2021

Accettato: 03/01/2022

Abstract

L'uso di utensili costituisce, accanto al linguaggio e alla locomozione bipede, un'abilità caratterizzante dell'essere umano. Nel corso degli ultimi cinquant'anni, sono stati sviluppati molteplici modelli neurocognitivi per spiegare questa capacità umana. Questi modelli sembrano spesso incompatibili tra loro, poiché riflettono la dicotomia tra l'approccio modale della *embodied cognition* e quello amodale delle teorie cognitive classiche. Evidenziando, da un lato, i limiti delle teorie amodali e, dall'altro, i rischi di sottovalutare le abilità cognitive umane di alto livello degli approcci *embodied*, in questo articolo, presentiamo una prospettiva integrata che individua nelle interazioni tra sistemi motori, ragionamento, cognizione semantica, funzione esecutiva e processi top-down i principali fondamenti neurocognitivi dell'uso umano degli utensili.

Parole chiave

Uso di utensili; Ragionamento; Cognizione Semantica; Azione; Sistemi Motori

Abstract

Alongside language and bipedal locomotion, tool use is a characterizing human ability. Over the past fifty years, distinct neurocognitive models have been developed to explain human tool use. These models often seem incompatible with one another, as they reflect the dichotomy between the embodied-cognition approach and the amodal approach of the classical cognitive theories. In this article, we highlight, on the one hand, the limitations of the amodal theories and, on the other hand, how strongly embodied approaches may underestimate the high-level human cognitive abilities implicated in tool use. Thus, here we present an integrated perspective that identifies the interactions between motor systems, reasoning, semantic cognition, executive function, and top-down processes as the main neurocognitive underpinnings of human tool use.

Keywords

Tool use; Reasoning; Semantic cognition; Action; Motor system

Introduzione

Una delle caratteristiche peculiari dell'uomo è la sua innata propensione a modificare l'ambiente in cui vive, adattandolo alle sue necessità. È possibile rintracciare gli esiti comportamentali di questa singolare inclinazione nel modo in cui gli esseri umani costruiscono e utilizzano oggetti di vario tipo. Questo assetto biologico e psicologico volto alla materialità, inteso nei termini di naturale predisposizione alla costruzione di manufatti, consente all'uomo di trasformare radicalmente, giorno dopo giorno, la superficie terrestre (Osiurak et al., 2020, 2021). Nel vasto insieme di manufatti costruiti dall'uomo è possibile identificare una specifica sottocategoria di oggetti, ricadente sotto l'etichetta di "utensile" (da ora in poi, useremo il termine inglese *tool*, ormai invalso in letteratura), attraverso il cui utilizzo è possibile risolvere problemi quotidiani (e.g., un martello, attraverso cui battere un chiodo al muro per appendere un quadro in soggiorno). Esistono molteplici tipologie di *tool*: si pensi all'enorme varietà di strumenti tecnologici sviluppati nell'ultimo secolo, dai telefoni cellulari alle navicelle spaziali. A sottolineare la pervasività del fenomeno, il lettore potrà facilmente trovarsi a leggere questo articolo proprio per mezzo di uno di questi *tool* evoluti, probabilmente un tablet, uno smartphone o il monitor di un computer. La scrittura stessa di questo manoscritto è avvenuta per mezzo di un *tool* digitale (i.e., un portatile). Pertanto, in questa sede, adopereremo il termine *tool* per riferirci a qualsiasi implementazione fisica attraverso cui sia possibile sfruttare l'ambiente per soddisfare i propri bisogni e perseguire i propri obiettivi (Federico e Brandimonte, 2019, 2020).

La definizione piuttosto ampia di *tool* che qui impieghiamo, oltre a situare questo articolo fuori dall'orbita delle discussioni specialistiche concernenti la neurobiologia dei sistemi di prensione e utilizzazione dello strumento in termini meccanicistici, vuole sottolineare le dimensioni cognitive di alto livello inscrivibili in questo complesso comportamento, evidenziando quindi la tipicità specie-specifica dello stesso. In altri termini, pur riconoscendo alcuni elementi di similarità neurobiologica e comportamentale (e.g., Sanz, Call e Boesch, 2013), riteniamo i comportamenti di utilizzazione e costruzione di utensili umani profondamente diversi da quelli di altri animali (Osiurak e Reynaud, 2019). Inoltre, l'intrinseco carattere di disponibilità ad usare strumenti per la risoluzione di problemi di ogni giorno, già brevemente accennato prima, permette di concepire l'uso dei *tool* nei termini di una particolare istanza di *problem solving* sostenuta da capacità di ragionamento tecnico (Federico, Osiurak, e Brandimonte, 2021), in ciò riconoscendo l'essere umano come *costruttore* e *utilizzatore* intelligente di utensili piuttosto che

<https://doi.org/10.53240/topic001.02>

come mero *manipolatore* di oggetti¹ (Osiurak e Federico, 2020). Pertanto, in questo breve articolo prospettico, più che ricapitolare i distinti approcci al tema (si veda Osiurak et al., 2017 per una recente rassegna), presentiamo una recente proposta teorica integrata all'uso dei *tool* (Federico, Osiurak, e Brandimonte, 2021; Federico e Brandimonte, 2019, 2020), entro la quale si enfatizzano le interazioni tra i sistemi neurocognitivi connessi a ragionamento tecnico² (Osiurak e Badets, 2016), cognizione semantica (e.g., Lambon Ralph et al., 2016), funzione esecutiva e processi di esplorazione visiva top-down (e.g., Bar et al., 2006). A supporto dell'impianto teorico, discuteremo alcune recenti evidenze sperimentali che sembrano suggerire l'esistenza di un processo cognitivo, da noi denominato *action reappraisal*, per mezzo del quale un agente può integrare molteplici "sorgenti" d'informazione (e.g., conoscenze meccaniche, funzionali, semantiche, astratte) per elaborare distinte possibilità di azione orientate verso uno scopo (Federico, Osiurak e Brandimonte, 2021; Federico, Osiurak, Reynaud, et al., 2021; Federico e Brandimonte, 2019, 2020; Osiurak, Federico, et al., 2020; Osiurak e Federico, 2020).

Mente, corpo e utensili

Quali sono le basi cognitive dell'uso degli utensili? Questa domanda può essere facilmente considerata alla base di alcuni degli argomenti più dibattuti delle scienze cognitive. Tuttavia, il tentativo di fornire risposta a questo quesito restituisce sistematicamente agli studiosi, ipostatizzandola per mezzo del risultato sperimentale, contezza di una "antica" ma tutt'oggi essenziale e attuale dimensione epistemologica: l'enorme eterogeneità di fattori fisici, psicologici e biologici che caratterizzano il rapporto tra soggetto e oggetto (Federico, 2020). Non stupisce, pertanto, come la portata delle argomentazioni sviluppate a partire da premesse di così ampio respiro abbia, nel corso dei decenni, dato origine ad un intenso dibattito in letteratura e a distinti orientamenti teoretici, di non sempre facile conciliabilità (Osiurak e Badets, 2017). Si assiste così, inizialmente, all'emergere di un apparato teorico che rintraccia e

¹ Nell'ambito delle principali teorie declinabili nel contesto della neuropsicologia dell'azione e della *embodied cognition* (Shapiro, 2019), la semplice visione di un utensile è condizione necessaria e sufficiente affinché un agente attivi, automaticamente, due distinte rappresentazioni mentali. La prima concerne le cosiddette *affordance strutturali* e si riferisce all'insieme di programmi motori che hanno l'obiettivo di istanziare l'utilizzazione dell'utensile dal punto di vista meccanicistico, individuando l'interfaccia sensomotoria tra la mano e l'utensile come destinataria degli esiti del processo cognitivo. La seconda, rimanda al concetto di *affordance funzionale* e consta di rappresentazioni associate alla funzione abituale dell'utensile e al suo concreto utilizzo (e.g., Buxbaum e Kalénine, 2010; Thill et al., 2013; Bach, Nicholson e Hudson, 2014; Kourtis e Vingerhoets, 2015; Kourtis, Vandemaele e Vingerhoets, 2018). L'ipotesi dell'attivazione automatica di queste rappresentazioni alla visione di un utensile è un aspetto cruciale della maggior parte degli approcci embodied all'uso di *tool* (e.g., Bach et al., 2014; Buxbaum, 2001; Gonzalez Rothi, Ochipa e Heilman, 1991; van Elk, van Schie e Bekkering, 2014). Si noti che termini quali "engramma del gesto" (Buxbaum, 2001), "engramma motorio visuo-cinestetico" (Heilman, Gonzalez Rothi e Valenstein 1982), "rappresentazione spazio-temporale del movimento" (Heilman e Watson, 2008), "rappresentazione di programmi motori di abilità precedentemente acquisite circa l'uso di oggetti" (Johnson-Frey, Newman-Norlund e Grafto, 2005), "conoscenza di manipolazione" (Bach et al., 2014; van Elk et al., 2014), così come molti altri, sono adoperati come sinonimi per riferirsi a questa tipologia di rappresentazioni.

² Con "ragionamento tecnico" o "conoscenza/e meccanica/che" intendiamo una forma di conoscenza sui principi meccanici che regolano il mondo fisico che è caratteristica dell'uomo (Osiurak, Lesourd, et al., 2020). Tale tipo di conoscenza non dichiarativa può essere considerata astratta poiché realtà fisica e meccanica non sono sovrapponibili. Pertanto, un singolo elemento materiale (ad esempio, il vetro) può avere proprietà fisiche distinte (ad esempio, durezza, nitidezza, trasparenza), laddove distinti elementi materiali (ad esempio, metallo o plastica) possono condividere la medesima proprietà fisica (ad esempio, durezza). Inoltre, alla pari di contesti d'azione governati da *problem solving* analogico, gli esseri umani sono in grado di trasferire rapidamente i principi meccanici appresi adoperando uno specifico utensile o in una specifica circostanza ad un altro utensile (ad esempio, un coltello può essere usato per avvitare una vite, in ciò trasferendo al coltello la funzione solitamente associata ad un cacciavite). È importante sottolineare come una delle peculiarità dell'uso dei *tool* si situi proprio in queste abilità di trasferimento (e.g., Penn, Holyoak e Povinelli, 2008). Il lettore può trovare un'approfondita discussione su questi aspetti in Osiurak e Badets (2016).

sviluppa l'idea cartesiana di una cognizione amodale, nella quale il livello di elaborazione semantico e concettuale precede sistematicamente e inesorabilmente quello sensomotorio. Successivamente, il superamento della dicotomia mente-corpo intercetta l'idea di una cognizione *embodied*, entro cui i processi di significazione sono completamente radicati nei sistemi motori e sensoriali del corpo (Shapiro, 2019). Si palesa così una discussione che, sorretta da evidenze di laboratorio spesso molto distanti da contesti di utilizzazione di utensili ecologici, diviene via via sempre più polarizzata nella direzione della *embodied cognition*³ che, pur avendo il grande merito di ridimensionare il peso della conoscenza semantica nell'azione, in modo presumibilmente involontario, incontra il rischio di "sotto-intellettualizzare" le straordinarie capacità cognitive umane, restituendo l'idea di un agente esclusivamente centrato sulla manipolazione (Federico, 2020; si veda anche la Nota 1).

La questione se i concetti possano o meno essere incorporati in rappresentazioni sensomotorie (ed, eventualmente, in che modo) può facilmente essere sostituita da una più analitica valutazione circa le distinte gradazioni di questo fenomeno, in ciò rintracciando modelli di cognizione amodale ibridi (e.g., Chatterjee, 2010; Dove, 2011; Meteyard et al., 2012). Dopotutto, se la questione cruciale è identificare cosa sia una rappresentazione sensomotoria e come questa possa essere coinvolta a qualsiasi livello di elaborazione concettuale e/o differenziarsi, o non differenziarsi, da processi cognitivi di altro ordine, non è possibile oggi ignorare la lezione delle moderne neuroscienze cognitive. Infatti, più di vent'anni di ricerca – al di là delle diverse interpretazioni – sottolineano come non sia facile operare una chiara e netta distinzione tra processi "motori", "sensomotori" e "cognitivi" in termini di funzionamento integrato della macchina cognitiva umana. Questa impossibilità ha portato, di recente, alcuni teorici a suggerire come la questione dell'*embodiment* sia di fatto irrisolvibile (e.g., Michel, 2020). A partire da questa constatazione di irrisolvibilità epistemologica, distinte aree del sapere della psicologia generale, quali ad esempio linguaggio, memoria e attenzione, si sono riorganizzate attorno ad una discussione che situa nella mediazione tra approcci modali e amodali, solo apparentemente contrastanti, le premesse per la costruzione di modelli ibridi che hanno il merito di ampliare gli orizzonti gnoseologici dei singoli settori di conoscenza coinvolti.

A ben vedere, la costruzione di un'epistemologia dell'uso dell'utensile fortemente caratterizzata dal primato delle abilità motorie può essere dovuta alla nostra limitata capacità di *spiegare* le capacità cognitive umane. In questo caso, infatti, soggetto e oggetto di conoscenza sono coincidenti e, pertanto, la *comprensione* di un fenomeno può non collimare necessariamente con la *spiegazione* dello stesso (Bullock et al., 1982). Quindi, limitandoci a *comprendere* come utilizziamo un utensile, potremmo invece scoprire la nostra incapacità di *spiegare* i processi cognitivi che danno origine a quel comportamento. La complessità della cognizione è pertanto qui in un certo qual modo celata dalla semplicità del comportamento. In altri termini, la "trappola epistemologica" potrebbe situarsi nel tentativo di *spiegare* la causa (il processo cognitivo) *comprendendo* esclusivamente l'effetto (il comportamento) e ciò corrisponderebbe alla fallacia argomentativa di affermare il conseguente. È possibile esemplificare ciò che stiamo provando ad evidenziare riferendoci alle relazioni di equilibrio tra oggetti fisici. Un oggetto appoggiato su un supporto

³ L'*embodied cognition* si pone in diretto antagonismo con i modelli di cognizione amodale. L'approccio amodale classico sottolinea come i processi di significazione e comprensione del mondo fisico possano essere concepibili solo in modo astratto (e.g., Fodor, 1975; Mahon, 2015; Mahon e Caramazza, 2008). Pertanto, il livello concettuale si distingue da quello sensomotorio secondo la formula per la quale l'azione è prima concepita per mezzo di rappresentazioni mentali astratte e, solo successivamente, eseguita mediante l'attivazione di specifici programmi motori. Al contrario, l'approccio *embodied* postula la completa sovrapposizione tra livello concettuale e sensomotorio, i quali risultano in questo modo inscindibili l'uno dall'altro.

è considerabile stabilmente in equilibrio *se e solo se* una linea immaginaria perpendicolare tracciata attraverso il baricentro dell'oggetto cade entro i confini del supporto stesso. Pur costituendo quanto appena espresso una *spiegazione* di fisica classica fondamentale, l'evidenza empirica è che le persone comunemente aderiscono a questo principio anche senza conoscerlo. In particolare, i bambini possono *capirlo* (Baillargeon et al., 1992) e ciò sottolinea come non sia necessario *spiegare* qualcosa per poterlo *comprendere* (Baillargeon et al., 1992; Bullock et al., 1982). Del resto, non si è dovuta attendere la scoperta di Newton per applicare la legge di gravità nella vita di tutti i giorni.

Tool come interfaccia cognitiva tra individuo e ambiente

Gli esseri umani costruiscono oggetti per gli scopi più disparati. Alcuni di questi oggetti sono piuttosto speciali, poiché permettono all'uomo di fare cose che, senza di essi, non sarebbe in grado di fare. Per esempio, si pensi a un martello. Nel momento in cui un agente afferra un martello per usarlo, egli acquista la capacità di battere un chiodo al muro, diventando in questo modo capace di appendere un quadro in salotto. Quindi, attraverso l'uso del martello, l'agente diviene capace di risolvere un problema (e.g., fissare un quadro alla parete) in ciò raggiungendo un determinato obiettivo (e.g., arredare il salotto). In altre parole, una sorta di "interfaccia cognitiva" è ciò che viene a inicializzarsi ponendo in "interazione funzionale" la mano dell'agente con l'utensile (i.e., il martello), e quest'ultimo con un altro oggetto (i.e., il chiodo). Costruendo e usando utensili, l'uomo è pertanto in grado di soddisfare i propri bisogni personali e raggiungere i propri scopi. Infatti, laddove anche i primati non umani possono manipolare efficacemente oggetti (e.g., Baber, 2003), le principali differenze circa l'uso di utensili tra esseri umani e non umani possono essere rintracciate nelle discontinuità evolutive relative alla coordinazione occhio-mano, all'apprendimento sociale, all'intelligenza, al linguaggio, alla funzione esecutiva e, soprattutto, al ragionamento causale (Vaesen, 2012). All'interno di una così vasta gamma di peculiarità cognitive, gli esseri umani sembrano, pertanto, essere unici nel modo di comprendere le relazioni causali tra l'uso di utensili e il raggiungimento di obiettivi (Povinelli et al., 2000). Tale comprensione causale implicita fornisce probabilmente la più concreta evidenza di proclività per la materialità degli esseri umani. Pertanto, appare evidente come indagare le basi cognitive dell'uso degli utensili sia un aspetto cruciale delle moderne neuroscienze cognitive e questa rilevanza è ben testimoniata dalla mole di ricerche svolte nell'ultimo secolo, in particolare per ciò che concerne i più recenti studi sull'elaborazione percettiva e semantica delle proprietà funzionali e motorie dei *tool* (Osiurak et al., 2017).

Gli utensili hanno una caratterizzazione intrinsecamente, ma non esclusivamente, "motoria". Basti pensare che la semplice vista di un *tool* produce attivazioni delle stesse aree cerebrali che sono coinvolte nel suo utilizzo (e.g., Chao e Martin, 2000; Johnson-Frey, 2004; Kròliczak e Frey, 2009). L'uso di un utensile è pertanto un processo che passa anche per la valutazione delle sue caratteristiche motorie (i.e., come questo sia afferrabile e manipolabile). Queste costituiscono parte integrante delle proprietà dell'oggetto, accanto a quelle visuo-percettive (i.e., dimensioni, forma, colore). Come evidenziavamo prima, non sorprende, quindi, che la maggior parte degli studi - soprattutto nel perimetro gnoseologico della neuropsicologia dell'azione (e.g., Buxbaum, 2001) - sottolineino fortemente gli aspetti associati alla *manipolazione* dei *tool*. L'assunto di base è, infatti, piuttosto semplice: gli esseri umani manipolano oggetti e, di conseguenza, immagazzinano informazioni (i.e., conoscenza sensorimotoria) relative a come manipolarli (Thill et al., 2013; si veda anche Tucker e Ellis, 2001). Tuttavia, da questo assunto tanto semplice quanto efficace deriva un corollario solo apparentemente lineare: quando un agente vede un *tool*

(i.e., il martello), egli attiva *automaticamente* le conoscenze sensomotorie precedentemente immagazzinate delle azioni che sono associate al *tool* (i.e., martellare) sotto forma di simulazioni motorie. In questo contesto, è il concetto di *affordance* (Gibson, 1977) a divenire piuttosto (ab)usato sulla base - presunta - che l'approccio gibsoniano supporti il primato sensomotorio (si veda la Nota 1). Andrebbe tuttavia notato come, per lo stesso Gibson (1977), le *affordance* non costituiscono forme di conoscenza sensomotoria, né forme di *conoscenza* alcuna (Gibson, 1977, 1979). Trattasi, invece, di un concetto che rimanda alle *possibilità di azione* rimesse alla disponibilità percettiva dal soggetto sulla base sia delle caratteristiche fisiche dell'oggetto sia di quelle bio-psicologiche del soggetto. Le *affordance*, quindi, non pertengono né al soggetto né all'oggetto, situandosi *tra* soggetto e oggetto, in ciò evidenziando un processo ecologico, adattivo e dinamico non ascrivibile a meccanismi di apprendimento passivo della relazione tra oggetti (si veda Nota 1). Pertanto, per quanto sottolineare il primato dell'elaborazione sensomotoria per mezzo del concetto delle *affordance* possa essere un modo piuttosto efficace per comprendere i meccanismi prensili e le capacità di apprendimento associativo implicate nel modo in cui gli scimpanzé manipolano oggetti, un approccio basato esclusivamente sulla manipolazione dei *tool*⁴ potrebbe non essere altrettanto adeguato a comprendere appieno i processi cognitivi associati all'uso di *tool* da parte di primati umani (Osiurak e Badets, 2016).

Uso di utensili e ragionamento tecnico

Abbiamo a più riprese sottolineato come, insieme al linguaggio e alla locomozione bipede, la costruzione e l'utilizzo di *tool* possano essere classificate nel vasto repertorio di abilità che caratterizzano l'ominide *sapiens sapiens* come specie. Ciò a sottolineare come i comportamenti di costruzione e utilizzazione di *tool* costituiscano probabilmente la più concreta testimonianza di sofisticazione cognitiva, per mezzo della quale possono sostanziarsi importanti processi di interazione funzionale tra uomo e ambiente. Questa interazione, come già detto, non riconosce somiglianze né alcun precedente nel mondo animale (e.g., Nonaka e Vaesen, 2012; Vaesen, 2012). Ciò poiché l'uomo è unico nella sua capacità di perseguire azioni orientate a scopi, modificando l'ambiente circostante in funzione del raggiungimento di obiettivi e del soddisfacimento di bisogni (Povinelli et al., 2000). Nel fare ciò, un agente può adoperare molteplici tipologie di *tool* con estrema flessibilità, alternando usi convenzionali (e.g., un martello per battere un chiodo al muro) ad usi meno comuni (e.g., un coltello per svitare una vite), in modo del tutto spontaneo e, soprattutto, senza alcun apparente sforzo cognitivo. La cognizione si riflette in azione, così fornendo un contesto privilegiato per evidenziare come la complessità di un processo cognitivo possa spesso situarsi proprio nella capacità di tradurre un'articolata sequenza di eventi neurobiologici in un comportamento di semplice decodifica fenomenologica (Federico, 2020).

⁴ L'assunto centrale dei modelli cognitivi sull'uso dei *tool* basati sulla conoscenza di manipolazione è che i sistemi motori che governano le interazioni prensili tra la mano e il *tool*, costituiti in particolare dalle aree dorsali della corteccia parietale sinistra, permettono agli esseri umani di memorizzare specifici programmi motori circa la corretta utilizzazione degli utensili (e.g., Buxbaum e Kalénine, 2010; Buxbaum, Shapiro, e Coslett, 2015; Daprati e Sirigu, 2006; Heilman et al., 1982; Johnson- Frey, 2004; Poizner et al., 1995; van Elk, van Schie, e Bekkering, 2014). In particolare, le informazioni contenute in questi programmi motori concernono le proprietà posturali e cinematiche dei movimenti della mano necessari affinché un agente possa afferrare e adoperare correttamente un *tool* (si veda la Nota 1). Sono pertanto modelli interni, ovvero rappresentazioni visuo-cinestesiche del movimento atte a guidare i movimenti della mano dell'agente (Buxbaum, 2017). Questi modelli interni sono appresi per meccanismi di "risonanza motoria" non sempre chiaramente dettagliati. Inoltre, accanto ai modelli sensomotori interni, osservare i movimenti della mano di un agente terzo impegnato nell'uso di un *tool* fornirebbe modelli esterni incorporabili e riattivabili all'occorrenza, per azioni successive (Stout e Hecht, 2017).

Il primato evolutivo che proviamo a rintracciare in queste righe diviene piuttosto evidente se si considera la moltitudine di *tool* estremamente sofisticati sviluppati dall'uomo e che hanno permesso a quest'ultimo di affermare la sua presenza *sulla* e finanche *oltre* la superficie terrestre: computer, autoveicoli, aeroplani, navicelle spaziali, tanto per menzionarne qualcuno (e.g., Osiurak et al., 2020). La capacità di costruire e utilizzare *tool*, quindi, può essere ragionevolmente assunta come un pilastro cognitivo umano sostenuto da specifici processi di ragionamento tecnico (Osiurak e Federico, 2021). Per comprendere meglio quanto appena espresso, torneremo all'esempio del martello impiegato per appendere un quadro in salotto. Attraverso questo esempio, infatti, è possibile mettere a fuoco l'eterogeneità delle variabili coinvolte persino nella più semplice delle attività del piantare un chiodo al muro. Infatti, per *risolvere il problema* di fissare un quadro alla parete, un agente dovrà utilizzare un ampio set di conoscenze meccaniche generabili a partire da processi di ragionamento tecnico (Osiurak, 2014; Osiurak et al., 2010; Goldenberg, 2013; Goldenberg e Hagmann, 1998; Goldenberg e Spatt, 2009). Per esempio, l'agente dovrà implicitamente comprendere come l'ancoraggio del chiodo al muro possa rappresentare un modo valido per costruire un sistema di forze fisiche in grado di impedire che il quadro cada a terra per effetto della gravità. Quindi, l'area del muro dove battere il chiodo dovrà essere scelta sulla base delle caratteristiche di friabilità dei materiali (chi proverebbe a battere un chiodo su una superficie metallica?). Lo spessore del chiodo dovrà essere commisurato al peso del quadro. Accanto a questa valutazione tecnica preliminare, l'agente dovrà riconoscere il martello come uno strumento di percussione adeguato. Pertanto, un programma motorio coerente dovrà essere istanziato per applicare una forza proporzionata alle caratteristiche del chiodo per evitare che questo si pieghi. Per fare questo, l'agente dovrà recuperare conoscenza sensomotoria per mezzo della quale produrre oscillazioni ritmiche e di ampiezza costante usando il suo braccio dominante, così da poter battere il chiodo nel muro. Si noti quindi come, in modo sorprendentemente naturale, l'agente si trovi, anche nel più semplice e prototipico contesto di utilizzazione di un *tool*, ad attivare un meccanismo reiterativo a cascata che consta sia di processi di ragionamento sia di processi motori. Pertanto, l'agente prima genererà azioni meccaniche per mezzo dei sistemi di ragionamento tecnico e, poi, selezionerà programmi motori appropriati per attualizzare tali azioni, risolvendo così il problema fisico (Osiurak et al., 2020). Si noti che questo meccanismo a cascata è pienamente conforme al principio ideomotorio, in quanto qualora un'azione meccanica non dovesse funzionare, l'agente potrà generarne un'altra, e così via (Badets e Osiurak, 2015).

L'interazione tra conoscenze meccaniche mediate da capacità di ragionamento tecnico e programmi motori sembrerebbe trovare importanti riscontri neurobiologici. Infatti, evidenze convincenti provenienti dalla neuropsicologia e dalle neuroscienze cognitive indicano un ampio network fronto-temporo-parietale quale principale correlato neurale della caratteristica attitudine umana a trasformare l'ambiente fisico costruendo e adoperando *tool* (e.g., Reynaud et al., 2016, 2019; Ishibashi et al., 2016; Lesourd et al., 2021). In particolare, la corteccia parietale inferiore (IPC) sinistra sembra essere implicata nella generazione di conoscenza meccanica (Osiurak et al., 2017; Goldenberg e Spatt, 2009; Martin et al., 2016; Salazar-Lopez et al., 2016). Sulla base di ciò, è stato recentemente proposto che la IPC sinistra, in particolare l'area PF (Glasser et al., 2016), possa costituire un locus cruciale del ragionamento tecnico umano. Quest'area, la più grande della IPC, costituirebbe una sorta *hub* entro cui si integrerebbero conoscenze semantiche circa le funzioni dei *tool* (i.e., sistema ventrale) e le rappresentazioni sensomotorie degli stessi (i.e., sistema dorso-dorsale; Osiurak et al., 2017; Rizzolatti e Matelli; 2003; Reynaud et al., 2016). Inoltre, lo spessore corticale dell'area PF della IPC sinistra risulta essere un predittore strutturale significativo della

performance a test psicotecnici in cui ai partecipanti è chiesto di ragionare su eventi fisici (Federico et al., *in revisione*). Coerentemente, la neuropsicologia clinica ha evidenziato come le abilità di problem solving meccanico possano essere compromesse per effetto di lesioni alla IPC (Goldenberg e Hagmann, 1998; Goldenberg e Spatt, 2009; Osiurak e Badets, 2016).

Action reappraisal

Nell'ambito dell'approccio all'uso dei *tool* basato sul ragionamento tecnico abbiamo recentemente introdotto il concetto di *action reappraisal* per delineare un meccanismo cognitivo multidimensionale attraverso il quale l'interazione di un agente con l'ambiente per mezzo dell'utilizzo dell'utensile può essere concettualizzata come prodotto dell'integrazione di molteplici fonti di informazione, per effetto di sistemi neurocognitivi distinti, in particolare conoscenza semantica, meccanica e sensomotoria (Federico e Brandimonte, 2019, 2020; Federico et al., 2021). Questo meccanismo - lungi dall'essere considerato come un processo automatico, centrato sulla manipolazione – suggerisce come, da un lato, la percezione delle *possibilità di azione* possa essere modulata dagli scopi e dagli obiettivi dell'agente (approccio *goal-oriented*) e, dall'altro, che la *propensione all'azione* degli individui possa essere influenzata sia dal contesto (modulazione bottom-up) che dalle esperienze e dalle conoscenze pregresse (modulazione top-down). Lo studio circa l'uso di utensili diviene pertanto un terreno di coltura epistemologico attraverso cui poter ibridare diversi domini cognitivi (e.g., attenzione, percezione, memoria, ragionamento, funzionamento esecutivo), sottolineando come l'adozione di un approccio trasversale possa essere estremamente prolifico per studiare un'attività così complessa. Negli ultimi anni, nuove evidenze si sono andate accumulando che sembrano supportare questo approccio.

Recenti studi che hanno usato tecnologia oculometrica (*eye-tracking*) hanno evidenziato come, dal punto di vista comportamentale, l'interazione tra sistemi di conoscenza semantica, meccanica e motoria prevista dall'approccio dell'*action reappraisal* possa influenzare l'allocatione temporale dell'attenzione visuo-spaziale (Federico et al., 2021; Federico e Brandimonte, 2019, 2020). In particolare, i pattern di fissazione delle aree di manipolazione (e.g., il manico di un martello) e di funzione (e.g., la testa di un martello) di un utensile, rispettivamente connesse all'elaborazione sensomotoria e semantico-meccanica dello stesso, appaiono modulabili dal contesto visuo-percettivo, dalla tipologia di compito, dalle conoscenze pregresse dell'osservatore e da processi di ragionamento causale. Così, in compiti di osservazione libera, coppie oggetto-*tool* semanticamente coerenti (e.g., un chiodo e un martello) sono osservate in modo diverso e più orientato all'azione rispetto a coppie semanticamente incoerenti (e.g., una sciarpa e un martello) o a coppie spazialmente ordinate in modo tale da non suggerire un'immediata possibilità di azione (e.g., un chiodo nello spazio extra-personale e un martello nello spazio peri-personale dell'osservatore; Federico e Brandimonte, 2019). Tuttavia, quando il compito di esplorazione visiva libera è sostituito da un compito semantico esplicito, ovvero un compito di riconoscimento sì-no nel quale l'osservatore è chiamato a valutare se un oggetto/*tool* è presente nella coppia oggetto-*tool* precedentemente vista, l'esplorazione visuo-spaziale sembra privilegiare una elaborazione in larga parte semantica (i.e., maggiori fissazioni alle aree funzionali degli utensili), indipendentemente dalle possibilità di azione suggerite dal contesto visuo-percettivo (Federico e Brandimonte, 2020). Coerentemente con questa interpretazione, la diversa modalità di codifica visiva si traduce in tempi di risposta minori per riconoscere *tool* facenti parte di coppie semanticamente coerenti (Federico e Brandimonte, 2020; Federico, 2020). A sottolineare il carattere multimodale dell'*action reappraisal*, risultati sovrapponibili sono

<https://doi.org/10.53240/topic001.02>

stati ottenuti adoperando un compito di priming verbale, in cui i *tool* (e.g., martello) venivano preceduti da parole semanticamente coerenti (e.g., “chiodo”) o meno (e.g., giacca; Federico et al., 2021). Inoltre, risultati preliminari sembrano mostrare che persino le conoscenze semantiche pregresse possano influenzare l'esplorazione visuo-spaziale di *tool* (Federico et al., *in preparazione*). L'allocatione dell'attenzione visuo-spaziale sugli utensili, tuttavia, non sembra essere modulata esclusivamente da compiti semantici espliciti (riconoscimento o priming verbale) o da compiti motori impliciti (osservazione libera). Infatti, processi di ragionamento inferenziale di alto livello, come stabilire le proprietà elettromagnetiche di un sistema fisico, sembrano produrre modificazioni subitane e implicite del modo di osservare una scena. Infatti, in un compito di osservazione libera, coppie oggetto-*tool*, con *tool* di metallo, disposte su un vassoio metallico entro cui era possibile scorgere un cavo elettrico scoperto, sono state osservate in modo diverso a seconda che la spina del cavo fosse o no collegata alla presa di corrente. Solo le coppie “non elettriche” raccoglievano maggiori fissazioni nelle aree prensili, in ciò palesando un pattern esplorativo che privilegia l'azione solo in assenza di “pericoli” (Federico et al., 2021).

Le evidenze comportamentali qui brevemente discusse evidenziano interazioni tra distinti sistemi di conoscenza, corroborando un'idea di funzionamento cognitivo orientato all'integrazione di molteplici modalità di informazione. È questa la sostanziale proposta teorica dell'*action reappraisal*. Accanto ai riscontri comportamentali, recenti evidenze di neuroimaging sembrano supportare questo approccio integrato. Infatti, i correlati neurali connessi all'identificazione, al riconoscimento e all'uso di *tool* comprendono un network fronto-temporo-parietale piuttosto esteso e multifunzionale (e.g., Rizzolatti e Matelli, 2003; Goldenberg e Spatt, 2009; Almeida et al., 2013; Ishibashi et al., 2016; Lesourd et al., 2021; Reynaud et al. 2016, 2019). Prendendo come riferimento anatomo-fisiologico la tripartizione dei flussi neurali introdotta da Rizzolatti e Matelli nel 2003 e la recente proposta neuropsicologica di Osiurak e colleghi (2017), i principali sistemi cerebrali coinvolti nell'elaborazione di oggetti e *tool* sono quelli del controllo motorio (i.e., il sistema dorso-dorsale), della conoscenza meccanica, ovvero del ragionamento tecnico (situabile nel sistema dorso-ventrale) e, infine, del sistema semantico (i.e., il sistema ventrale; Goldenberg e Spatt, 2009; Almeida et al., 2013; Osiurak et al., 2017; Ishibashi et al., 2016). A sostegno del processo di integrazione di informazioni previsto dalla teoria dell'*action reappraisal*, recenti evidenze hanno dimostrato come siano le aree cerebrali parietali inferiori e temporo-mediali a generare rappresentazioni multimodali dell'azione legate all'uso di oggetti (per esempio, Chen et al., 2018; De Bellis et al. 2018; Lambon Ralph et al., 2017; Wurm e Caramazza 2019; Lesourd et al., 2021; Humphreys et al., 2021). Inoltre, molteplici studi hanno mostrato il coinvolgimento di aree prefrontali nei processi esecutivi connessi al timing, motorio, al sequenziamento di azioni e alla simulazione motoria (e.g., Koechlin e Summerfield, 2007; Bortoletto e Cunnington, 2010). Tuttavia, mentre i processi d'integrazione a carattere temporo-parietale sopra descritti sono stati piuttosto indagati in letteratura, molto meno spazio è stato destinato allo studio delle aree frontali. Ciononostante, queste aree potrebbero partecipare attivamente al meccanismo di *action reappraisal* permettendo a un osservatore di selezionare, tra le molteplici informazioni e possibilità di azione disponibili nell'ambiente, quelle più coerenti con le proprie intenzioni, sulla base di meccanismi top-down di *sequencing* e valutazione probabilistica di eventi futuri (Federico et al., *in preparazione*; Bar et al., 2006; per una discussione più estesa si veda anche Federico e Brandimonte., 2020). In breve, oltre ai meccanismi di integrazione meccanico-motoria fin qui ricapitolati, un forte supporto all'idea dell'*action reappraisal* proviene da studi che hanno evidenziato il coinvolgimento di specifici network frontali e temporo-parietali nei processi di integrazione multimodale concernenti

azione, linguaggio, cognizione semantica e percezione di oggetti (e.g., Chen et al., 2018; De Bellis et al. 2020; Lambon Ralph et al., 2017; Wurm e Caramazza 2019; Lesourd et al., 2021; Pupíková et al., 2021). Una recente conferma circa l'esistenza di un meccanismo di *action reappraisal* proviene da un recente studio di risonanza magnetica funzionale (fMRI) e stimolazione elettrica transcranica (tDCS) di Pupíková e colleghi (2021). Questi autori hanno evidenziato come la stimolazione di specifiche aree del network fronto-parieto-temporale summenzionato con venti minuti di tDCS anodica da 2mA possa aumentare le prestazioni di partecipanti impegnati in un compito di riconoscimento simile a quello sviluppato da Federico e Brandimonte (2020), fornendo quindi la prima solida evidenza causale dei meccanismi di *action reappraisal*. Sulla base di questi riscontri e dell'ampia letteratura qui riassunta, sono al momento in corso studi di connettività funzionale volti a indagare più nel dettaglio i correlati anatomo-funzionali dell'*action reappraisal*.

Conclusioni

In questo articolo prospettico, abbiamo discusso il meccanismo di *action reappraisal* da noi recentemente proposto e completamente declinato nella prospettiva teorica dell'approccio "reasoning-based" all'uso dei *tool*. Questo approccio all'uso dell'utensile enfatizza il ruolo - sottolineandone le implicazioni - del ragionamento umano, dei processi cognitivi di ordine superiore e del funzionamento esecutivo nel modo in cui si percepiscono, riconoscono ed adoperano gli utensili. Lo studio circa i fondamenti neurocognitivi dell'uso di utensili è un settore di ricerca che si colloca all'intersezione di distinti domini di ricerca: percezione, memoria, attenzione, psicolinguistica, neuroscienze, nonché psicologia dello sviluppo e psicologia comparata. La nostra proposta si situa nei domini della percezione, della memoria semantica e dell'attenzione visuo-spaziale e cerca di fornire risposte legate al recente dibattito scientifico circa i processi cognitivi ed i sistemi neurocognitivi coinvolti nell'uso degli utensili. L'interesse verso i *tool* è naturalmente strumentale rispetto alla possibilità di analizzare i meccanismi alla base dei processi di significazione attraverso cui la mente umana decodifica, interpreta e produce rappresentazioni della realtà. Infatti, se da un lato ci si rifà a un approccio all'uso dei *tool* basato sul ragionamento, dall'altro si fornisce la possibilità di introdurre una prospettiva teorica basata sulla riscoperta del valore della conoscenza semantica, in ciò controbilanciando l'entusiasmo, spesso immotivato, per i modelli puramente *embodied* della cognizione umana. Questa prospettiva mira così a restituire un'immagine dell'architettura cognitiva umana che privilegia un'elaborazione delle informazioni dinamica e flessibile, pur non disconoscendo l'importanza dell'elaborazione sensomotoria. L'uso dei *tool* è quindi considerato come una capacità emergente dall'integrazione di distinti tipi di conoscenza (i.e., semantica, meccanica e sensomotoria) realizzabile attraverso l'attività di distinti sistemi cerebrali. Va da sé che, a fronte di una sempre crescente evidenza a supporto del concetto di *action reappraisal*, la strada verso la piena comprensione dei meccanismi che sottendono all'uso umano di *tool* è ancora lunga e saranno necessari molti altri studi prima di arrivare ad apprezzarne appieno la complessità.

Bibliografia

- Almeida, J., Fintzi, A. R., & Mahon, B. Z. (2013). Tool manipulation knowledge is retrieved by way of the ventral visual object processing pathway. *Cortex*, 49(9), 2334-2344.
- Baber, C. (2003). *Cognition and tool use: Forms of engagement in human and animal use of tools*. London, England: Taylor & Francis.

<https://doi.org/10.53240/topic001.02>

- Bach, P., Nicholson, T., & Hudson, M. (2014). The affordance-matching hypothesis: how objects guide action understanding and prediction. *Frontiers in human neuroscience*, 8, 254.
- Badets, A., & Osiurak, F. (2015). A goal-based mechanism for delayed motor intention: Considerations from motor skills, tool use and action memory. *Psychological Research*, 79(3), 345-360.
- Baillargeon, R., Needham, A., & DeVos, J. (1992). The development of young infants' intuitions about support. *Early development and parenting*, 1(2), 69-78.
- Bar, M., Kassam, K. S., Ghuman, A. S., Boshyan, J., Schmid, A. M., Dale, A. M., ... & Halgren, E. (2006). Top-down facilitation of visual recognition. *Proceedings of the national academy of sciences*, 103(2), 449-454.
- Bortoletto, M. & Cunnington, R. Motor timing and motor sequencing contribute differently to the preparation for voluntary movement. *Neuroimage*, 49(4), 3338-3348 (2010).
- Bullock, M., Gelman, R., & Baillargeon, R. (1982). The development of causal reasoning. *The developmental psychology of time*, 209-254.
- Buxbaum, L. J. (2001). Ideomotor apraxia: a call to action. *Neurocase*, 7(6), 445-458.
- Buxbaum, L. J. (2017). Learning, remembering, and predicting how to use tools: Distributed neurocognitive mechanisms: Comment on Osiurak and Badets (2016). *Psychological Review*, 124(3), 346-360.
- Buxbaum, L. J., & Kalénine, S. (2010). Action knowledge, visuomotor activation, and embodiment in the two action systems. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1191, 201.
- Buxbaum, L. J., Shapiro, A. D., & Coslett, H. B. (2015). Reply: Apraxia: a gestural or a cognitive disorder?. *Brain*, 138(3), e334-e334.
- Chao, L. L. & Martin, A. (2000). Representation of manipulable man-made objects in the dorsal stream. *Neuroimage*, 12(4), 478-484 (2000).
- Chatterjee, A. (2010). Disembodying cognition. *Language and cognition*, 2(1), 79-116.
- Chen, Q., Garcea, F. E., Jacobs, R. A., & Mahon, B. Z. (2018). Abstract representations of object-directed action in the left inferior parietal lobule. *Cerebral Cortex*, 28(6), 2162-2174.
- Daprati, E., & Sirigu, A. (2006). How we interact with objects: learning from brain lesions. *Trends in cognitive sciences*, 10(6), 265-270.
- De Bellis, F., Magliacano, A., Sgaliano, L., Conson, M., Grossi, D., & Trojano, L. (2018). Left inferior parietal and posterior temporal cortices mediate the effect of action observation on semantic processing of objects: evidence from rTMS. *Psychological Research* 84, 1006-1019.
- Dove, G. (2011). On the need for embodied and dis-embodied cognition. *Frontiers in Psychology*, 1, 242.
- Federico, G. (2020). *Action Reappraisal: An integrated and reasoning-based perspective of human tool use* [Doctoral final dissertation]. Suor Orsola Benincasa University, Naples.
- Federico, G., & Brandimonte, M. A. (2019). Tool and object affordances: an ecological eye-tracking study. *Brain and cognition*, 135, 103582.
- Federico, G., & Brandimonte, M. A. (2020). Looking to recognise: the pre-eminence of semantic over sensorimotor processing in human tool use. *Scientific reports*, 10(1), 1-16.
- Federico, G., Osiurak, F., & Brandimonte, M. A. (2021). Hazardous tools: the emergence of reasoning in human tool use. *Psychological Research*, 1-11.
- Federico, G., Osiurak, F., Brandimonte, M. A., Salvatore, M., & Cavaliere, C. (2021). The visual encoding of graspable unfamiliar objects (under revision).
- Federico, G., Osiurak, F., Reynaud, E., & Brandimonte, M. A. (2021). Semantic congruency effects of prime words on tool visual exploration. *Brain and Cognition*, 152, 105758.
- Fodor, J. A. (1975). *The language of thought* (Vol. 5). Harvard university press.
- Gibson, J. J. (1977). The theory of affordance. In R. E. Shaw & J. Bransford (Eds.), *Perceiving, acting, and knowing: Toward an ecological psychology* (pp. 62-82). Hillsdale, NJ: Erlbaum.
- Gibson, J. J. (1979). *The ecological approach to visual perception*. Boston, MA: Houghton Mifflin Co.
- Glasser, M. F., Coalson, T. S., Robinson, E. C., Hacker, C. D., Harwell, J., Yacoub, E., ... & Van Essen, D. C. (2016). A multi-modal parcellation of human cerebral cortex. *Nature*, 536(7615), 171-178.
- Goldenberg, G. (2013). *Apraxia: The cognitive side of motor control*. Oup Oxford.
- Goldenberg, G., & Hagmann, S. (1998). Tool use and mechanical problem solving in apraxia. *Neuropsychologia*, 36(7), 581-589.
- Goldenberg, G., & Spatt, J. (2009). The neural basis of tool use. *Brain*, 132(6), 1645-1655.

- Gonzalez Rothi, L. J., Ochipa, C., & Heilman, K. M. (1991). A cognitive neuropsychological model of limb praxis. *Cognitive Neuropsychology*, 8(6), 443-458.
- Heilman, K. M., & Watson, R. T. (2008). The disconnection apraxias. *Cortex*, 44(8), 975-982.
- Heilman, K. M., Rothi, L. J., & Valenstein, E. (1982). Two forms of ideomotor apraxia. *Neurology*, 32(4), 342-342.
- Humphreys, G. F., Ralph, M. A. L., & Simons, J. S. (2021). A unifying account of angular gyrus contributions to episodic and semantic cognition. *Trends in Neurosciences*.
- Ishibashi, R., Pobric, G., Saito, S., & Lambon Ralph, M. A. (2016). The neural network for tool-related cognition: an activation likelihood estimation meta-analysis of 70 neuroimaging contrasts. *Cognitive Neuropsychology*, 33(3-4), 241-256.
- Johnson-Frey, S. H. (2004). The neural bases of complex tool use in humans. *Trends in cognitive sciences*, 8(2), 71-78.
- Johnson-Frey, S. H., Newman-Norlund, R., & Grafton, S. T. (2005). A distributed left hemisphere network active during planning of everyday tool use skills. *Cerebral cortex*, 15(6), 681-695.
- Koechlin, E., & Summerfield, C. (2007). An information theoretical approach to prefrontal executive function. *Trends in cognitive sciences*, 11(6), 229-235.
- Kourtis, D., & Vingerhoets, G. (2015). Perceiving objects by their function: An EEG study on feature saliency and prehensile affordances. *Biological psychology*, 110, 138-147.
- Kourtis, D., Vandemaele, P., & Vingerhoets, G. (2018). Concurrent cortical representations of function-and size-related object affordances: an fMRI study. *Cognitive, Affective, & Behavioral Neuroscience*, 18(6), 1221-1232.
- Króliczak, G., & Frey, S. H. (2009). A common network in the left cerebral hemisphere represents planning of tool use pantomimes and familiar intransitive gestures at the hand-independent level. *Cerebral Cortex*, 19(10), 2396-2410.
- Lambon Ralph, M. A., Jefferies, E., Patterson, K., & Rogers, T. T. (2017). The neural and computational bases of semantic cognition. *Nature Reviews Neuroscience*, 18(1), 42-55.
- Lesourd, M., Servant, M., Baumard, J., Reynaud, E., Ecochard, C., Medjaoui, F. T., ... & Osiurak, F. (2021). Semantic and action tool knowledge in the brain: identifying common and distinct networks. *Neuropsychologia*, 107918.
- Mahon, B. Z. (2015). What is embodied about cognition?. *Language, cognition and neuroscience*, 30(4), 420-429.
- Mahon, B. Z., & Caramazza, A. (2008). A critical look at the embodied cognition hypothesis and a new proposal for grounding conceptual content. *Journal of physiology-Paris*, 102(1-3), 59-70.
- Martin, A., Kronbichler, M., & Richlan, F. (2016). Dyslexic brain activation abnormalities in deep and shallow orthographies: A meta-analysis of 28 functional neuroimaging studies. *Human brain mapping*, 37(7), 2676-2699.
- Meteyard, L., Cuadrado, S. R., Bahrami, B., & Vigliocco, G. (2012). Coming of age: A review of embodiment and the neuroscience of semantics. *Cortex*, 48(7), 788-804.
- Michel, C. (2020). Overcoming the modal/amodal dichotomy of concepts. *Phenomenology and the Cognitive Sciences*, 1-23.
- Nonaka, T., & Vaesen, K. (2012). What exists in the environment that motivates the emergence, transmission, and sophistication of tool use? *Behavioral and Brain Sciences*, 35(4), 233.
- Osiurak, F. (2014). What neuropsychology tells us about human tool use? The four constraints theory (4CT): mechanics, space, time, and effort. *Neuropsychology Review*, 24(2), 88-115.
- Osiurak, F., & Badets, A. (2016). Tool use and affordance: Manipulation-based versus reasoning-based approaches. *Psychological review*, 123(5), 534.
- Osiurak, F., & Federico, G. (2020). Four ways of (mis-) conceiving embodiment in tool use. *Synthese*, 1-27.
- Osiurak, F., & Reynaud, E. (2020). The elephant in the room: What matters cognitively in cumulative technological culture. *Behavioral and Brain Sciences*, 43.
- Osiurak, F., De Oliveira, E., Navarro, J., Lesourd, M., Claidière, N., & Reynaud, E. (2016). Physical intelligence does matter to cumulative technological culture. *Journal of Experimental Psychology: General*, 145(8), 941.
- Osiurak, F., Federico, G., Brandimonte, M. A., Reynaud, E., & Lesourd, M. (2020). On the temporal dynamics of tool use. *Frontiers in Human Neuroscience*, 14.
- Osiurak, F., Jarry, C., & Le Gall, D. (2010). Grasping the affordances, understanding the reasoning: toward a dialectical theory of human tool use. *Psychological review*, 117(2), 517.
- Osiurak, F., Lasserre, S., Arbanti, J., Brogniart, J., Bluet, A., Navarro, J., & Reynaud, E. (2021). Technical reasoning is important for cumulative technological culture. *Nature Human Behaviour*, 1-9.
- Osiurak, F., Lesourd, M., Navarro, J., & Reynaud, E. (2020). Technition: When tools come out of the closet. *Perspectives on Psychological Science*, 15(4), 880-897.

<https://doi.org/10.53240/topic001.02>

- Osiurak, F., Rossetti, Y., & Badets, A. (2017). What is an affordance? 40 years later. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 77, 403-417.
- Patterson, K., & Lambon Ralph, M. A. (2016). The hub-and-spoke hypothesis of semantic memory. In *Neurobiology of language* (pp. 765-775). Academic Press.
- Penn, D. C., Holyoak, K. J., & Povinelli, D. J. (2008). Darwin's mistake: Explaining the discontinuity between human and nonhuman minds. *Behavioral and Brain Sciences*, 31(2), 109-130.
- Poizner, H., Clark, M., Merians, A. S., Macauley, B., Rothi, L. J. G., & Heilman, K. M. (1995). Joint coordination deficits in limb apraxia. *Brain*, 118(1), 227-242.
- Povinelli, D.J., Reaux, J. E., Theall, L. A., Giambrone, S., & Humphrey, N. (2000). *Folk physics for apes: The chimpanzee's theory of how the world works* (Vol. 7). Oxford: Oxford University Press.
- Reynaud, E., Lesourd, M., Navarro, J., & Osiurak, F. (2016). On the neurocognitive origins of human tool use: A critical review of neuroimaging data. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 64, 421-437.
- Reynaud, E., Navarro, J., Lesourd, M., & Osiurak, F. (2019). To watch is to work: a review of neuroimaging data on tool use observation networks. *Neuropsychology Review*, 29(4), 484-497.
- Rizzolatti, G., & Matelli, M. (2003). Two different streams form the dorsal visual system: anatomy and functions. *Experimental brain research*, 153(2), 146-157.
- Salazar-López, E., Schwaiger, B. J., & Hermsdörfer, J. (2016). Lesion correlates of impairments in actual tool use following unilateral brain damage. *Neuropsychologia*, 84, 167-180.
- Sanz, C. M., Call, J., & Boesch, C. (Eds.). (2013). *Tool use in animals: cognition and ecology*. Cambridge University Press.
- Shapiro, L. (2019). *Embodied cognition*. Routledge.
- Stout, D., & Hecht, E. E. (2017). Evolutionary neuroscience of cumulative culture. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 114(30), 7861-7868.
- Thill, S., Caligiore, D., Borghi, A. M., Ziemke, T., & Baldassarre, G. (2013). Theories and computational models of affordance and mirror systems: an integrative review. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 37(3), 491-521.
- Tucker, M., & Ellis, R. (2001). The potentiation of grasp types during visual object categorisation. *Visual cognition*, 8(6), 769-800.
- Vaesen, K (2012). The cognitive bases of human tool use. *Behavioral and Brain Sciences* 35 (4):203-262.
- van Elk, M., van Schie, H., & Bekkering, H. (2014). Action semantics: A unifying conceptual framework for the selective use of multimodal and modality-specific object knowledge. *Physics of life reviews*, 11(2), 220-250.
- Wurm, M. F., & Caramazza, A. (2019). Distinct roles of temporal and frontoparietal cortex in representing actions across vision and language. *Nature communications*, 10(1), 1-10.