

Afordancje i informacja semantyczna: propozycja formalizacji

Szymon Talaga 

Instytut Studiów Społecznych im. prof. Roberta Zajonca,
Uniwersytet Warszawski
stalaga@protonmail.com

Przyjęto 25 czerwca 2019; zaakceptowano 27 marca 2020; opublikowano 25 maja 2020

Abstrakt

Pojęcia afordancji i informacji są kluczowymi elementami gibsonowskiej psychologii ekologicznej. Są też bezpośrednio powiązane, ponieważ z punktu widzenia zorientowanego na cel organizmu działającego w określonym środowisku pierwszorzędne znaczenie mają informacje określające jego możliwości. Jednocześnie zwykle przyjmuje się, że matematyczna teoria informacji nie ma zastosowania w psychologii ekologicznej, gdyż nie daje odpowiednich narzędzi do modelowania wartości i znaczenia, czyli opisu tego, co istotne z punktu widzenia organizmu. Innymi słowy, zarzuca się, że nie pozwala ona na poprawne ujęcie ekologicznie rozumianej semantyki.

W pracy tej pokazuję, że nowe idee z obszaru teorii informacji oraz przede wszystkim pojęcie informacji semantycznej mogą być wykorzystane do sformułowania ścisłej, formalnej definicji afordancji. Wynik ten nie tylko wzbogaca dyskusję na temat formalnych definicji oraz ontologii afordancji, ale ma też szereg praktycznych implikacji. Proponowana formalizacja, dzięki swojej ilościowej i generycznej formie, pozwala na systematyczne wykrywanie relacji między właściwościami organizmu a właściwościami środowiska prowadzących do zaistnienia afordancji w dowolnych układach organizm–środowisko oraz umożliwia ilościowy i znormalizowany pomiar stopnia, w jakim dane środowisko jest nasycone afordancjami z punktu widzenia określonego agenta. Służące do tego metody obliczeniowe zilustrowano na przykładzie prostego, wyidealizowanego układu organizm–środowisko.

Słowa kluczowe: afordancja; informacja; informacja semantyczna; informacja wzajemna; entropia; teoria informacji; psychologia ekologiczna; semantyka

1. Wprowadzenie

Pojęcie afordancji jest bezsprzecznie jednym z najważniejszych i najpopularniejszych elementów teorii psychologii ekologicznej. Odnosi się do możliwości organizmu wynikających z interakcji między jego cechami a właściwościami środowiska (Gibson, 1979). Jako takie, afordancje są relacyjnej natury, nie wynikają ani z cech organizmu, ani środowiska, lecz z relacji synergii między nimi (Heft, 2001; Michaels i Carello, 1981). Jednocześnie, odnosząc się do możliwości, afordancje wyznaczają znaczenie środowiska z punktu widzenia danego organizmu.

Drugim kluczowym dla psychologii ekologicznej pojęciem jest „informacja”. W szczególności istotne jest pojęcie informacji bodźcowej (*stimulus information*) (Gibson, 1960, 1979), rozumianej jako ustrukturyzowany rozkład energii (na przykład światła), który zawiera w sobie informacje na temat generującego ją źródła. Wprowadzając tę koncepcję, James J. Gibson zrywa z tradycyjnym w psychologii modelem bodziec–reakcja, w którym bodziec sam z siebie nie niesie informacji, i na jego miejsce proponuje teorię odbioru informacji (*information pick-up*) (Gibson, 1979). W tym ujęciu zasadniczym zadaniem realizowanym przez system percepcyjny jest ekstrakcja informacji możliwie jednoznacznie określających afordancje dostępne dla organizmu w otaczającym rozkładzie energii (*ambient energy array / ambient energy distribution*) (Turvey i Shaw, 1995).

Afordancje i informacja są więc ze sobą ściśle powiązane. W istocie jedną z najistotniejszych dla praktykujących psychologów ekologicznych klas problemów jest określanie niezmienników (*invariants*), czyli praw, które odnoszą do siebie wzorce rozkładów energii oraz konkretne rodzaje obiektów, zdarzeń i afordancji. W badaniach tego rodzaju fakt istnienia danej afordancji oraz jej definicja są zazwyczaj przyjmowane (często *implicite*) jako założenia początkowe. Dokładniej rzecz biorąc, zazwyczaj bada się konkretną afordancję, na przykład wchodzenia-po-schodach, której istnienie zakłada się *a priori*, i następnie próbuje się zidentyfikować informacje bodźcowe, które pozwalają ją wykrywać (np. van der Kamp, Savelsbergh, i Davis, 1998; Warren, 1984). Kwestia tego, co to oznacza, że w danym układzie organizm–środowisko występują afordancje, jest rzadko rozważana. Oczywiście, ogólna definicja afordancji jako możliwości wynikających z relacji cech organizmu i otoczenia jest powszechnie akceptowana, jednak mimo to wciąż brakuje jej formalnego i ścisłego opisu. Pewne bardzo istotne kroki w kierunku formalizacji tego pojęcia zostały poczynione przez Michaela T. Turvey’ego (1992) i Anthony’ego Chemero (2003), jednak w obu przypadkach proponowane rozwiązania są dalekie od ścisłości pozwalającej na ilościowe wyrażanie faktu występowania afordancji.

W niniejszej pracy proponuję ścisłą i generyczną formalizację afordancji opartą na pojęciu informacji semantycznej, która pozwala na ilościowe wyrażanie kilku istotnych właściwości układów organizm–środowisko. Proponowane podejście jest ścisłe, ponieważ opiera się na aparacie matematycznym teorii informacji i sugeruje konkretne metody wykrywania i pomiaru afordancji, oraz generyczne, gdyż stosuje się w taki sam sposób do każdego rodzaju afordancji bez względu na ich konkretną postać. Innymi słowy, afordancja siadania na krześle, wchodzenia po schodach, czy otwierania drzwi może być wyrażona formalnie przy użyciu tej samej uniwersalnej metody. Generyczny, ilościowy opis afordancji może się wydawać niepotrzebny, zwłaszcza w kontekście prostych i bliskich nam systemów (na przykład człowiek-krzesło), które są łatwe do intuicyjnego zrozumienia. Jednakże w przypadku

układów bardziej skomplikowanych, w których zbiór możliwych afordancji oraz ich faktyczna dostępność mogą być trudne do jednoznacznego określenia (na przykład strony internetowe), uniwersalna formalna definicja występowania afordancji oraz ich kwantyfikacja mogą być potencjalnie użytecznymi narzędziami ułatwiającymi ich wykrywanie, opis i analizę.

Reszta artykułu zorganizowana jest w następujący sposób. Najpierw omówiono historycznie uwarunkowane trudności związane z łączeniem psychologii ekologicznej i teorii informacji oraz przedstawiono wstępny szkic ich rozwiązania wykorzystującego koncepcję informacji jako różnicy. Potem wprowadzono najważniejsze terminy teorii informacji, które następnie wykorzystano do zdefiniowania kluczowego pojęcia informacji semantycznej. W kolejnej sekcji sformułowany zostaje proponowany formalizm służący do opisu afordancji wraz z koniecznymi metodami obliczeniowymi. Na koniec omówiono i podsumowano przedstawione podejście.

2. Afordancje i informacja

Gibson odrzucił możliwość wykorzystania teorii informacji w psychologii ekologicznej, chociaż samo pojęcie informacji pojawia się w niej bardzo często. Stwierdził, że:

(...) informacja percepcyjna nie może być zdefiniowana i mierzona w taki sam sposób jak informacja w ujęciu Clauda Shannona (1979, s. 232, tłum. własne).

Obawy te były uzasadnione, gdyż ówczesna matematyka i fizyka nie dostarczały narzędzi odpowiednich do uchwycenia znaczenia i wartości niesionych przez informacje, zaś sama teoria informacji została stworzona do rozwiązywania innych problemów. Trzydzieści lat wcześniej potwierdził to sam Claude Shannon:

Często komunikaty coś znaczą; tj. odnoszą się zgodnie z pewnym ustalonym systemem reguł do jakichś określonych fizycznych lub koncepcyjnych bytów. Tego rodzaju semantyczne aspekty komunikacji są nieistotne z punktu widzenia problemu technicznego. To, co jest istotne to fakt, że przekazywany komunikat jest wybrany ze zbioru wszystkich możliwych komunikatów (1948, s. 31, tłum. własne).

Być może jednak sytuacja nie jest aż tak beznadziejna, jak by się mogło wydawać, i istnieje możliwość opisu informacji istotnej z punktu widzenia psychologii ekologicznej przy użyciu formalnych narzędzi teorii informacji? Kwestii tej poświęcone będą kolejne sekcje. Najpierw jednak warto przyjrzeć się dokładniej związkowi między afordancjami a informacją.

3. Różnica, która robi różnicę

Pojęcie informacji można definiować na wiele sposobów oraz dzielić na różne rodzaje w zależności od kontekstu i specyfiki rozwiązywanego problemu. Ciekawe i – jak zobaczymy – bardzo użyteczne w naszej sytuacji, podejście do tego problemu zaproponował Gregory Bateson. W jego ujęciu o informacji można myśleć w kategoriach „różnicy, która robi różnicę” (1978, s. 453). Taka interpretacja jest całkowicie uzasadniona z perspektywy teorii informacji (więcej na ten temat w kolejnej sekcji) i jednocześnie podkreśla naturalną odpowiedniość między pojęciami informacji i afordancji.

Mówiąc o „różnicy, która robi różnicę” (*difference which makes a difference*), Bateson odnosi się do dwóch podstawowych faktów. Po pierwsze, informacja istnieje tylko poprzez zróżnicowanie elementów. Mapa w postaci białej, pustej karty nie może zawierać w sobie żadnej informacji na temat ukształtowania terenu w jakimkolwiek regionie przestrzeni. Bezpośredni związek między różnicą i różnorodnością (elementów systemu) a informacją jest jednym z najbardziej fundamentalnych założeń teorii informacji. Drugi fakt jest natury ekologicznej i dotyczy tego, że spośród nieprzebranej wielości potencjalnych informacji (zbioru wszystkich możliwych różnic i relacji między elementami jakiegoś systemu) wybierane jest przede wszystkim to, co ma znaczenie z punktu widzenia danego organizmu w danym otoczeniu. To założenie Batesona jest równocześnie jednym z kluczowych założeń psychologii ekologicznej, wedle której najważniejszym zadaniem percepcji jest wyławianie tej części dostępnej informacji, która ma znaczenie z punktu widzenia celów organizmu. W ten sposób informacja istotna z punktu widzenia jakiegoś agenta to ta część różnic (całości informacji), która ma dla niego jakieś znaczenie. Ten rodzaj informacji można nazwać „informacją semantyczną”, czyli taką, która posiada wartość z punktu widzenia organizmu w środowisku. Zatem opis informacji u Batesona jest zgodny z teorią informacji (informacja jako różnica), ale jednocześnie odnosi się właśnie do informacji semantycznej (różnica, która robi różnicę). Dlatego to podejście jest dobrym punktem wyjścia do definiowania informacji semantycznej przy użyciu narzędzi teorii informacji.

Teraz zauważmy, że w bardzo podobny sposób można myśleć o afordancjach. Skoro wynikają one z zaistnienia odpowiednich relacji między właściwościami organizmu i środowiska, to dwa identyczne układy organizm–środowisko muszą odpowiadać takim samym zbiorom afordancji.

Jednocześnie dwa różne układy też mogą odpowiadać takim samym zbiorom afordancji i być pod tym względem nieodróżnialne od siebie. Z kolei między dwoma układami różniącymi się pod względem afordancji zawsze musi występować jakaś różnica. Ostatecznie więc przy porównywaniu dwóch układów organizm–środowisko, gdy dany jest pewien zbiór afordancji, które są dostępne tylko w jednym z nich, każda z afordancji będzie związana z jakąś różnicą między tymi układami. Innymi słowy, o afordancjach również można myśleć w kategoriach różnicy, która robi różnicę. Są więc one w tym ujęciu bezpośrednio związane z informacją semantyczną (w ujęciu Batesona) zawartą w środowisku z punktu widzenia danego organizmu. Można więc powiedzieć, że informacja semantyczna to ta część informacji, która specyfikuje afordancje.

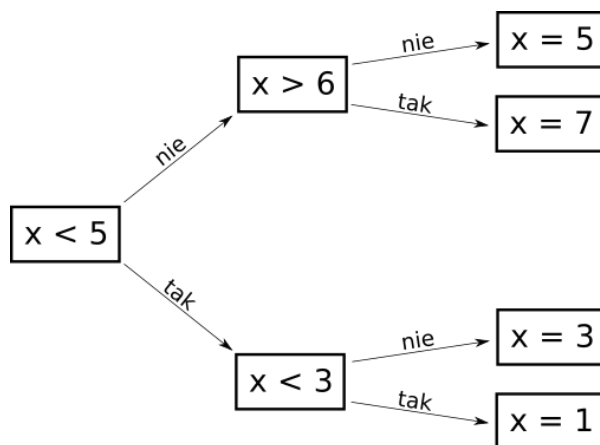
4. Informacja i entropia

Teraz konieczne jest ściśle zdefiniowanie podstawowych pojęć teorii informacji, które będą niezbędne do formalnego opisu afordancji. Najważniejszą i najbardziej podstawową wielkością w teorii informacji jest entropia (Shannona), która wyraża ilość informacji zawartej w danym systemie (jednostką są bity). Niech X jest dyskretną zmienną losową przyjmującą wartości od x_1 do x_n z rozkładem masy prawdopodobieństwa $p_X(x)$. Wówczas entropia zdefiniowana jest następująco:

$$H(X) = - \sum_i p_X(x_i) \log_2 p_X(x_i)$$

Entropia mierzy w istocie oczekiwane „zaskoczenie” (wartość informacyjną) przy wybieraniu losowych wartości zmiennej X , które wyraża się jako $-\log_2 p_X(x_i)$ (Shannon, 1948). Jest zatem dobrą miarą zróżnicowania elementów systemu modelowanego przez zmienną losową X . Zauważmy też, że entropia zawsze wynosi zero dla zmiennych, które przyjmują tylko jedną wartość: system złożony z tylko jednego symbolu nie może przekazać żadnej informacji, tak jak lampa, która zawsze jest zgaszona (lub zapalona), nigdy nie będzie mogła niczego sygnalizować. Dlatego informacja jest zawsze bezpośrednio związana z pojęciami różnicy i zróżnicowania.

Entropia w bezpośredni sposób wyraża ilość informacji zawartej w danym systemie (zmiennej losowej), ponieważ określa oczekiwaną liczbę binarnych pytań (takich, na które odpowiada się tylko „tak” lub „nie”), które trzeba zadać, żeby odgadnąć wartość wybraną w sposób losowy z danego rozkładu prawdopodobieństwa (Lissowski i in., 2008). W ten sposób mówi o tym, ile informacji na temat danego zjawiska trzeba zdobyć, aby móc przewidzieć jego wartość (por. rysunek 1).



Rysunek 1. Entropia jako oczekiwana liczba binarnych pytań, które trzeba zadać, aby odgadnąć wartość wylosowaną z danego rozkładu prawdopodobieństwa.

Można również zdefiniować łączną entropię dla rozkładu dwóch dyskretnych zmiennych losowych X i Y przyjmujących wartości od x_1 do x_n oraz od y_1 do y_m (Cover i Thomas, 2006). Ma ona następującą postać:

$$H(X, Y) = - \sum_i \sum_j p_{X,Y}(x_i, y_j) \log_2 p_{X,Y}(x_i, y_j)$$

Ważną cechą łącznej entropii jest to, że gdy zmienne X i Y są niezależne, łączna entropia sprowadza się do sumy entropii obu zmiennych z osobna:

$$H(X, Y) = H(X) + H(Y)$$

Łączna entropia pozwala na zdefiniowanie bardzo ważnego pojęcia informacji wzajemnej:

$$I(X; Y) = H(X) + H(Y) - H(X, Y)$$

Informacja wzajemna jest wielkością symetryczną i – jak łatwo zauważyć – wynosi dokładnie zero, gdy X i Y są niezależne. Określa stopień, w jakim znajomość wartości jednej zmiennej pozwala na przewidywanie wartości drugiej zmiennej. Innymi słowy, jest miarą tak zwanej informacji syntaktycznej, czyli poziomu skorelowania między stanami dwóch systemów (Cover i Thomas, 2006; Kolchinsky i Wolpert, 2018).

5. Informacja semantyczna

W tej sekcji uściślona zostanie definicja informacji semantycznej w sposób, który następnie pozwoli na sformułowanie formalnej, ilościowej definicji afordancji. Od tego momentu informację semantyczną będziemy rozumieć w sposób zbliżony, choć nie identyczny, do tego, który zaproponowali Kolchinsky i Wolpert (2018). W tym ujęciu kluczowe jest rozróżnienie między informacją syntaktyczną a semantyczną. Jak już powiedziano, informacja syntaktyczna jest miarą skorelowania stanów dwóch systemów, która wyraża się poprzez ich wzajemną informację. Następnie spośród sumy bitów opisujących właściwości układu organizm–środowisko wyróżnić można te, których zachowanie pozwala na maksymalizację tak zwanej „wydolności” (*viability*) organizmu przy jednoczesnym zachowaniu pełnej informacji wzajemnej (syntaktycznej). Bity te będą właśnie informacją semantyczną, czyli tą częścią całkowitej informacji na temat układu, która ma znaczenie z punktu widzenia funkcjonowania organizmu. Teraz trzeba tylko odpowiedzieć na pytanie o to, co ma oznaczać w tym kontekście „wydolność”.

Kolchinsky i Wolpert wyprowadzają swoje podejście z argumentów termodynamicznych i dlatego wydolność organizmu definiują w kategoriach entropii (różnorodności i nieuporządkowania) jego stanów. Im mniejsza wydolność, tym wyższa entropia, gdyż na poziomie entropii mikrostanów (możliwych ułożeń atomów) organizmu tylko nieliczne wysoce uporządkowane stany pozwalają na podtrzymanie życia (Kolchinsky i Wolpert, 2018). Jest to zatem dobry wybór miary wydolności, jeśli chcemy definiować semantykę środowiska bezpośrednio w odniesieniu do podstawowych procesów biofizycznych organizmu. Jednakże w przypadku analizy ekologicznej, która operuje na wyższym, molarnym poziomie analizy (Heft, 2001), potrzebne jest inne rozwiązanie.

W przeciwieństwie do poziomu biofizycznego, na poziomie ekologicznym wydolność organizmu działającego celowo w pewnym środowisku może być definiowana w odniesieniu do zakresu dostępnych możliwości. Założenie takie jest zasadne, gdy przyjmie się, że podstawowym celem inteligencji istot żywych jest zapewnienie swobody działania niezbędnej do podtrzymania życia. Zwierzę musi być władne przemieszczać się na przykład między legowiskiem, wodopojem i terenami łownymi, aby móc przeżyć. Założenia tego typu można znaleźć na przykład w fizycznych modelach inteligencji opartych na maksymalizacji entropii

możliwych przyszłych stanów (Wissner-Gross i Freer, 2013). Wobec tego, tak rozumiana wydolność organizmu odnosi się bezpośrednio do zakresu dostępnych w danym środowisku afordancji. Zatem informacja semantyczna w tym kontekście to ta część informacji opisującej układ organizm–środowisko, która określa dokładnie warunki bezpośrednio związane z zakresem możliwości organizmu. Można to wyrazić w ścisły sposób za pomocą entropii możliwych (makro)stanów organizmu, takich jak miejsca, w których może się znaleźć, i czynności, które może wykonać. Ostatecznie więc informacja semantyczna w tym ujęciu to dokładnie te bity, które opisują korelacje między właściwościami układu organizm–środowisko a możliwościami organizmu.

Występowanie afordancji w pewnym układzie organizm–środowisko można więc wyrazić w ścisły, ilościowy sposób. Proponowana formalizacja jest również całkowicie generyczna, gdyż na żadnym etapie nie wymaga niczego poza łącznym rozkładem prawdopodobieństwa po właściwościach układu organizm–środowisko i stanów organizmu, który jest niezbędny do wyznaczania entropii i informacji wzajemnej. Innymi słowy, gdy dysponujemy takim rozkładem, możemy badać opisywany przezeń system bez konieczności zakładanie czegokolwiek więcej na jego temat.

6. Formalizacja afordancji

Teraz możemy sformułować metodę formalnego, ilościowego opisu afordancji. Jakkolwiek jedynym wymogiem jest określenie rozkładu łącznego właściwości układu organizm–środowisko i stanów organizmu, to dla lepszego zrozumienia najlepiej zacząć od prostego modelu organizmu, środowiska i związanej z nimi „fizyki”, po czym dopiero z tego modelu wyprowadzić potrzebny rozkład.

6.1. Przykładowy model fizyki i układu organizm–środowisko

Środowisko ma następujące właściwości:

- jest 2-wymiarowe z osią x prostopadłą do siły grawitacji i osią y równoległą do niej;
- w środowisku jest pewien nieprzerwany układ poziomych i pionowych powierzchni złożonych ze skończonej liczby dyskretnych segmentów o szerokości i wysokości równej 1;
- segmenty powierzchni są sztywne i nie ulegają deformacji;
- środowisko jest stałe i nie ulega zmianom.

Organizm jest opisany przez następujące właściwości:

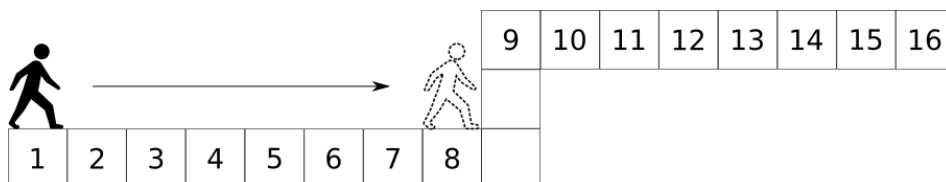
- stałymi właściwościami organizmu są jego wysokość $h = 2$ oraz szerokość $w = 1$;
- stanem organizmu jest jego położenie (określone przez współrzędne x, y).

Dodatkowo zakładamy, że organizm ma do dyspozycji następującą afordancję atomową:

- krok w lewo/prawo, jeżeli wysokość zajmowanego segmentu jest wyższa/niższa od segmentu sąsiadującego o nie więcej niż 1.

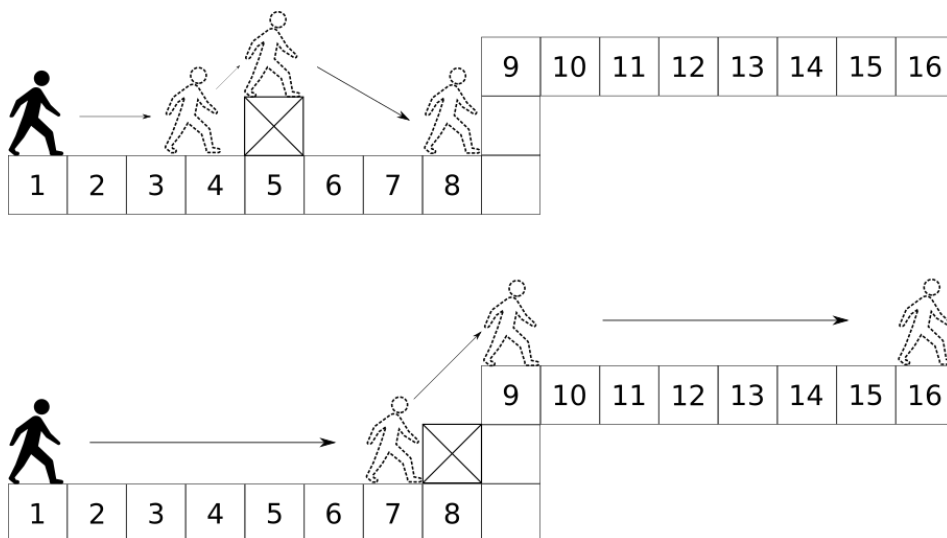
Wprowadzone tu pojęcie afordancji atomowych odnosi się do najbardziej podstawowych afordancji, których występowanie zakłada się w modelu. Może się wydawać, że wpadamy w tym momencie w rozumowanie kołowe, w którym próbujemy sformalizować afordancje, odwołując się do afordancji. Chwilowo nie będziemy się tym przejmować, ale w jednej z kolejnych sekcji pokażę, dlaczego tak naprawdę nie jest to problem.

Rysunek 2 przedstawia trywialny przykład układu organizm–środowisko spełniającego powyższe wymogi, w którym nie ma afordancji innych niż założona afordancja atomowa. Wykorzystując ukształtowanie terenu oraz założoną afordancję atomową, organizm może się poruszać po segmentach 1-8, ale nie może przejść dalej, bo zmiana wysokości między polem 8 a 9 jest większa niż 1. Entropia możliwych stanów (miejsc, w których organizm może się znaleźć) to 3 bity. Zakładamy tu, że każdy dostępny stan jest tak samo prawdopodobny. Właściwości układu organizm–środowisko są stałe, więc ich entropia wynosi 0.



Rysunek 2. Układ organizm–środowisko bez afordancji innych niż atomowe. Organizm może swobodnie przemieszczać się po segmentach 1-8 ale nie dalej, gdyż blokuje go ściana o wysokości 2, której nie może pokonać (jest za wysoka).

Rozważmy teraz, co się stanie, jeśli umieścimy w środowisku rodzaj skrzynki o wysokości i szerokości 1. Zakładając, że może się ona znaleźć z takim samym prawdopodobieństwem na każdym z pierwszych ośmiu segmentów, entropia rozkładu po właściwościach układu organizm–środowisko wynosi 3 bity. Teraz zauważmy, że jeśli skrzynka stoi na którymkolwiek z segmentów 1-7, to entropia po rozkładzie możliwych stanów organizmu wynosi nadal 3 bity, gdyż organizm dalej nie będzie w stanie przekroczyć skarpy sąsiadującej z segmentem 8. Jednakże jest jedno szczególne miejsce, czyli segment 8, w którym ustawienie skrzynki prowadzi do zwiększenia zakresu możliwych stanów organizmu na podstawie samej fizyki układu organizm–środowisko i założonej afordancji atomowej (por. rysunek 3). W tym przypadku entropia stanów organizmu wynosi 4, a więc wzrosła o 1 bit w porównaniu do wcześniejszych warunków. Zatem konfiguracja, w której skrzynka stoi na segmencie 8, odpowiada pojawieniu się afordancji wejścia na skarpe i możliwości dotarcia do pól 9-16. Innymi słowy, afordancja wejścia na skarpe realizuje się tu poprzez relację między właściwościami organizmu (możliwość pokonania stopnia o wysokości 1) i stanem środowiska (skrzynka o wysokości 1 stoi na pozycji 8).



Rysunek 3. Skrzynka stojąca na segmentach 1-7 nie prowadzi do pojawienia się nowych afordancji (górze). Jednak gdy zostanie ustawiona na polu 8, to zakres możliwości organizmu zwiększa się, co oznacza pojawienie się nowych afordancji (dół). W szczególności kombinacja właściwości organizmu z położeniem skrzynki w segmencie 8 prowadzi do zaistnienia afordancji wejścia-na-skarpę.

Powyższe jest przykładem emergentnego wyłonienia się afordancji pod warunkiem odpowiedniej konfiguracji właściwości organizmu i środowiska. Jednocześnie fakt ten jest w pełni obserwowalny na poziomie ilościowego wskaźnika, jakim jest entropia rozkładu stanów organizmu. Teraz posłużymy się wprowadzonym przykładem, żeby wyprowadzić łączny rozkład właściwości układu organizm–środowisko i stanów organizmu oraz zdefiniować właściwe metody obliczeniowe.

6.2. Metoda

Niech X jest dyskretną zmienną losową modelującą właściwości układu organizm–środowisko oraz niech Y jest dyskretną zmienną losową określającą stan organizmu. Rozkład łączny obu zmiennych oznaczmy przez $p_{X,Y}(x, y)$ (wyznacza on również oba rozkłady brzegowe). Wówczas $I(X; Y)$ to informacja wzajemna między konfiguracją właściwości organizmu i środowiska a stanem organizmu. Entropia rozkładu właściwości układu organizm–środowisko $H(X)$ określa ilość informacji potrzebnej do jego pełnego opisu. Określenie informacji semantycznej sprowadza się do sprawdzenia, jaka jest minimalna liczba bitów informacji na temat układu organizm–środowisko, którą trzeba zostawić, żeby zachować pełną informację wzajemną $I(X; Y)$, określającą stopień skorelowania właściwości układu organizm–środowisko z możliwymi stanami organizmu.

Do rozwiązania tego problemu konieczne jest wybranie odpowiedniej funkcji uproszczenia (*coarse-graining function*) ϕ , która określa, jakich konfiguracji właściwości układu organizm–środowisko nie powinno się rozróżniać. Dokładniej rzecz biorąc, ϕ przekształca układ X w uproszczony układ X' (i analogicznie przekształca związany z nim rozkład masy prawdopodobieństwa). Optymalna funkcja ϕ indukuje takie uproszczenie, które minimalizuje entropię $H(X')$, zachowując niezmienną informację wzajemną, czyli $I(X'; Y) = I(X; Y)$. Wówczas $H(X')$ to liczba bitów semantycznych w układzie organizm–środowisko. Jako że zawsze $0 \leq H(X') \leq H(X)$, to możliwe jest wyznaczenie znormalizowanego współczynnika „semantyczności” środowiska η , który określa, jak duży odsetek informacji na temat układu jest istotny dla organizmu:

$$\eta = \frac{H(X')}{H(X)} \in [0, 1]$$

Zauważmy również, że optymalna funkcja uproszczenia ϕ będzie zawsze określać, które dokładnie konfiguracje właściwości układu organizm–środowisko są związane z afordancjami.

Zobaczymy teraz, jak przebiega zdefiniowana powyżej procedura w przypadku przedstawionego wcześniej środowiska ze skrzynką. Tabela 1 przedstawia łączny rozkład właściwości organizmu–środowisko (w naszym prostym przykładzie jedyną zmienną właściwością jest pozycja skrzynki) i stanu organizmu, czyli jego pozycji. Zakładamy tu, że warunkowo na daną pozycję skrzynki każdy możliwy stan organizmu (pozycja) jest tak samo prawdopodobny oraz że skrzynka może stać z równym prawdopodobieństwem na każdym z segmentów 1-8.

Oczywistym wyborem funkcji uproszczenia ϕ w tym kontekście jest funkcja odwzorowująca liczby od 1 do 7 na tę samą wartość oraz liczbę 8 na inną, taka jak:

$$\phi(x) = \begin{cases} 1, & \text{gdy } x = 1, \dots, 7 \\ 2, & \text{gdy } x = 8 \end{cases}$$

Uzyskujemy wówczas maksymalnie uproszczony opis układu organizm–środowisko, który wciąż zachowuje pełną informację na temat korelacji ze stanem organizmu (por. tabela 2).

W obu przypadkach uzyskana informacja wzajemna jest taka sama $I(X; Y) = I(X'; Y) = 0,212$. Jednocześnie uproszczony opis właściwości układu organizm–środowisko ma istotnie mniejszą entropię $H(X') = 0,543 < H(X) = 3$. Oznacza to, że w układzie jest 0,543 bita informacji semantycznej. Współczynnik semantyczności η wynosi zatem 0,181. Jednocześnie forma optymalnej funkcji uproszczenia wskazuje na segment nr 8 jako na tę szczególną pozycję, w której skrzynka istotnie zwiększa możliwości organizmu. Udało się więc w precyzyjny, ilościowy sposób wyrazić fakt pojawienia się afordancji przy pewnej konfiguracji właściwości układu organizm–środowisko, określić znormalizowany stopień istotności układu (w danej reprezentacji) z punktu widzenia organizmu oraz zidentyfikować konkretną konfigurację właściwości tworzącą daną afordancję.

Tabela 1. Łączny rozkład właściwości układu organizm–środowisko i stanów organizmu

Stan organizmu (pozycja w osi x)	Właściwości układu organizm–środowisko (pozycja skrzynki)							
	1	2	3	4	5	6	7	8
1	1/64	1/64	1/64	1/64	1/64	1/64	1/64	1/128
2	1/64	1/64	1/64	1/64	1/64	1/64	1/64	1/128
3	1/64	1/64	1/64	1/64	1/64	1/64	1/64	1/128
4	1/64	1/64	1/64	1/64	1/64	1/64	1/64	1/128
5	1/64	1/64	1/64	1/64	1/64	1/64	1/64	1/128
6	1/64	1/64	1/64	1/64	1/64	1/64	1/64	1/128
7	1/64	1/64	1/64	1/64	1/64	1/64	1/64	1/128
8	1/64	1/64	1/64	1/64	1/64	1/64	1/64	1/128
9								1/128
10								1/128
11								1/128
12								1/128
13								1/128
14								1/128
15								1/128
16								1/128

Tabela 2. Optymalnie uproszczony łączny rozkład właściwości układu organizm–środowisko i stanów organizmu

Stan organizmu (pozycja w osi x)	Właściwości układu organizm–środowisko (pozycja skrzynki)	
	1	2
1	7/64	1/128
2	7/64	1/128
3	7/64	1/128
4	7/64	1/128
5	7/64	1/128
6	7/64	1/128
7	7/64	1/128
8	7/64	1/128
9		1/128
10		1/128
11		1/128
12		1/128
13		1/128
14		1/128
15		1/128
16		1/128

6.3. Wybór funkcji uproszczenia

Problemem oczywiście pozostaje wybór optymalnej funkcji uproszczenia. W przedstawionym prostym przykładzie rozwiązanie jest oczywiste, ale w innych przypadkach odnalezienie optymalnego φ może być bardzo trudne. Wynika to stąd, że problem ten sprowadza się tak naprawdę do przeszukania przestrzeni wszystkich możliwych podziałów n -elementowego zbioru, a wiadomo, że liczba takich podziałów rośnie bardzo szybko wraz z n (są to tak zwane liczby Bella). Na przykład podziałów zbioru 8-elementowego jest 4096 a 10-elementowego

już 115 975 (Aitken, 1933). Dobrze byłoby więc mieć ogólną i wydajną metodę pozwalającą na określanie optymalnej funkcji uproszczenia.

Szczegółowe omówienie tego problemu wykracza poza zakres tej pracy. Niemniej jednak przedstawimy heurystykę pozwalającą na przybliżone rozwiązanie oparte na tak zwanej dywergencji Jensena-Shannona (np. Lin, 1991). Określa ona stopień odległości (niepodobieństwa) między dwoma rozkładami prawdopodobieństwa i przyjmuje wartości od 0 (identyczne rozkłady) do 1 (rozkłady z całkowicie rozłącznymi zbiorami wartości o niezerowym prawdopodobieństwie). Określa się ją następującym wzorem:

$$\text{JSD}(P, Q) = \frac{1}{2}(D(P \parallel M) + D(Q \parallel M))$$

gdzie P i Q są pewnymi rozkładami prawdopodobieństwa a $M = (P + Q) / 2$ jest ich uśrednieniem. Funkcja $D(X \parallel Y)$ to dywergencja Kullbacka-Leiblera (Lin, 1991) określona w następujący sposób:

$$D(P \parallel Q) = - \sum_i P(x_i) \log_2 \frac{Q(x_i)}{P(x_i)}$$

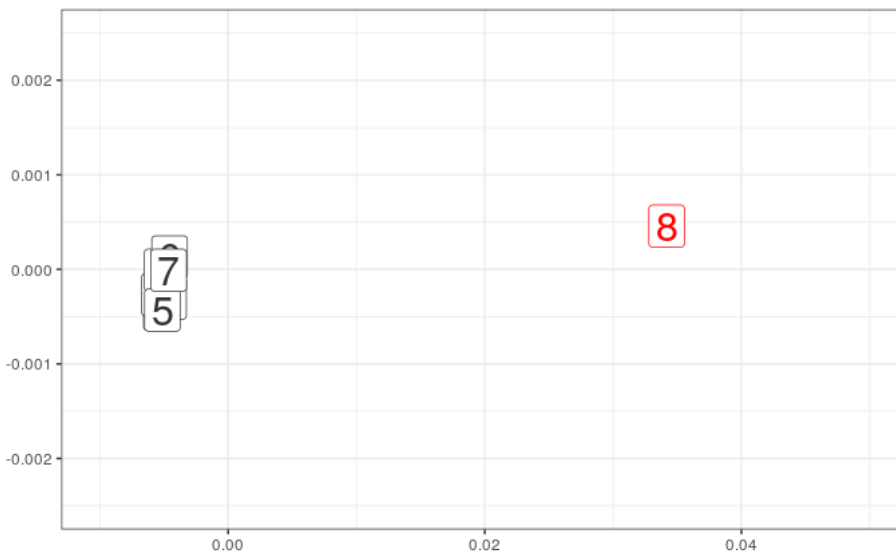
Dywergencja Jensena-Shannona jest dobrym narzędziem do rozwiązania postawionego problemu, ponieważ jest symetryczna, znormalizowana i w przeciwieństwie do dywergencji Kullbacka-Leiblera jest zdefiniowana również dla rozkładów, z którymi wiążą się zdarzenia występujące z zerowym prawdopodobieństwem. Zwłaszcza ta ostatnia własność jest kluczowa przy analizie afordancji, gdyż z definicji wiążą się one z tym, że w pewnych warunkach pewne rzeczy są możliwe, a w innych nie. Co więcej, pierwiastek kwadratowy dywergencji Jensena-Shannona jest poprawną metryką odległości i spełnia nierówność trójkątną (Lin, 1991)¹.

Grupy nieodróżnialnych konfiguracji właściwości układu organizm-środowisko można zidentyfikować w następujący sposób. Dla każdej konfiguracji wyznaczmy warunkowy rozkład prawdopodobieństwa po stanach organizmu (można je wyprowadzić bezpośrednio z rozkładu łącznego) i następnie dla każdej pary konfiguracji obliczmy pierwiastek kwadratowy dywergencji Jensena-Shannona. W ten sposób otrzymamy macierz (układ wartości liczbowych) określającą stopień niepodobieństwa (odległość) między wszystkimi parami konfiguracji. Następnie możemy wykorzystać standardowe metody analizy skupień oparte na analizie odległości do wykrycia grup równoważnych konfiguracji oraz skalowanie wielowymiarowe do wizualizacji rozwiązania (Timm, 2002).

Rysunek 4 przedstawia wynik grupowania konfiguracji przy użyciu powyższej metody. Widać, że segmenty od 1 do 7 są wzajemnie nieodróżnialne, podczas gdy segment 8 jest od nich wyraźnie odseparowany. Wynik wyznacza więc dokładnie formę optymalnej funkcji uproszczenia ϕ .

¹ Spełnianie nierówności trójkątnej jest istotne, gdyż dzięki temu pierwiastek kwadratowy dywergencji Jensena-Shannona pozwala na poprawne wyznaczanie niepodobieństwa (odległości) między różnymi konfiguracjami właściwości układu organizm-środowisko.

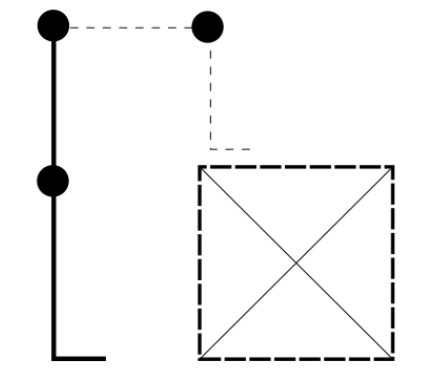
a segmenty 1-7 (afordancja trywialna) **a** segment 8 (afordancja nietrywialna)



Rysunek 4. Równoważność między konfiguracjami właściwości układu organizm–środowisko (pozycjami skrzynki). Diagram przedstawia odległości między konfiguracjami wyznaczone przy użyciu dywergencji Jensena-Shannona i zwizualizowane za pomocą metrycznego skalowania wielowymiarowego (naniesiono sztuczny szum, żeby segmenty 1-7 nie nakładały się idealnie na siebie). Widać, że segmenty od 1 do 7 tworzą jeden spójny klaster i są nieodróżnialne od siebie (skrzynka w tych pozycjach nie zwiększa możliwości organizmu), podczas gdy segment 8 jest wyraźnie odseparowany (skrzynka w tej pozycji zwiększa możliwości organizmu). Rozwiązanie wyznacza więc dokładnie formę optymalnej funkcji uproszczenia.

7. Afordancje atomowe

Powrócimy teraz do wspomnianego wcześniej problemu afordancji atomowych. Żeby wyprowadzić łączny rozkład właściwości układu organizm–środowisko i stanu organizmu, wprowadziliśmy prosty model fizyki, w którym założyliśmy, że organizm ma do dyspozycji pewną podstawową, atomową afordancję, która jest konieczna, aby mogły pojawić się afordancje złożone. Wydaje się więc, że wpadamy w pułapkę rozumowania kołowego, w którym, żeby formalnie i precyzyjnie określić, czym jest afordancja, musimy odwołać się do pojęcia afordancji. Nie jest to jednak problem. Zauważmy, że założona afordancja atomowa może wynikać z innego, prostszego modelu (por. rysunek 5). W takim modelu oczywiście konieczne będzie założenie jakichś innych afordancji atomowych, ale na pewnym poziomie będą one w sposób całkowicie trywialny wynikać z samej fizyki modelu, przez co rozpatrywanie ich na poziomie psychologii ekologicznej nie będzie miało żadnego sensu. W ten sposób zakładane w modelu afordancje atomowe – o ile je poprawnie wybrano i zdefiniowano – są po prostu elementem modelu fizyki.



Rysunek 5. Prosty model nóg, w którym afordancja chodzenia oraz zwłaszcza wchodzenia i schodzenia pojawia się emergentnie. Nogi mogą zginać się w stawach (zaznaczonych kołami). Nogi mogą przesuwać się w kierunku którejś ze stóp, jeśli są w stabilnej pozycji, gdzie stabilna pozycja to taka, w której stopy oparte są o poziomą powierzchnię. Widać, że w takim modelu nie trzeba zakładać afordancji wchodzenia-na-skrzynkę, żeby mogła się ona pojawić.

Ponadto problem afordancji atomowych jest tak naprawdę niezależny względem proponowanej formalizacji i związanych z nią metod, ponieważ nie wymaga ona żadnego modelu fizyki, a jedynie łącznego rozkładu właściwości układu organizm–środowisko i stanów organizmu. Model fizyki był wprowadzony jedynie po to, żeby zilustrować i ułatwić zrozumienie proponowanego podejścia. Oczywiście w określonych przypadkach wyprowadzenie rozkładu łącznego z jakiegoś modelu może być właściwym rozwiązaniem, ale może on być również określany w inny sposób, na przykład empirycznie na drodze obserwacji. Niemniej jednak nawet w przypadku empirycznego ustalania rozkładu zawsze przemycane będą jakieś założenia na temat charakteru badanych procesów, chociażby poprzez określenie kategorii uwzględnianych zdarzeń.

8. Dyskusja

W niniejszej pracy przedstawiłem nowy, w pełni generyczny sposób formalizacji pojęcia afordancji wraz z metodami obliczeniowymi pozwalającymi na systematyczne wykrywanie i ilościowy opis afordancji. Może to być istotny wkład w dyskusję na temat ontologii i formalnych definicji afordancji, ponieważ proponowane podejście wykracza poza wcześniejsze rozwiązania, w których afordancje definiowano przy użyciu formuł logicznych (np. Chemero, 2003; Turvey, 1992), i wprowadza do tych rozważań formalizm teorii informacji. W ten sposób proponowana formalizacja przynajmniej częściowo rozwiązuje stary problem tego, jak można by pogodzić psychologię ekologiczną z matematyczną teorią informacji.

Wprowadzone metody obliczeniowe zostały sformułowane wyłącznie w odniesieniu do modeli wykorzystujących tylko dyskretne zmienne losowe, ale było to podyktowane jedynie kwestiami prostoty wywodu. Wszystkie podstawowe metody współczesnej teorii informacji

można stosować w analogiczny sposób do ciągłych systemów (choć często w praktyce jest to istotnie trudniejsze). Dotyczy to więc też wszystkich technik zaproponowanych w tej pracy. Jednocześnie warto zauważyć, że założenie jednostajnych rozkładów prawdopodobieństwa po właściwościach układu organizm–środowisko i stanach organizmu też nie jest konieczne i było używane tylko jako uproszczenie. W rzeczywistości oparcie całego podejścia na teorii informacji pozwala na stosowanie arbitralnych rozkładów prawdopodobieństwa, co może być wykorzystane między innymi do uwzględniania w modelu dostępności afordancji, na przykład zgodnie z propozycją traktowania afordancji jako funkcji probabilistycznych (Franchak i Adolph, 2014).

Przedstawione podejście oczywiście w żaden sposób nie zmienia naszego podstawowego rozumienia afordancji, w końcu na nim bazuje. Nie będzie też raczej przydatne w badaniu konkretnych afordancji, które skupione będzie na przykład na określaniu związanych z nimi niezmienników i zmiennych informacyjnych (Jacobs i Michaels, 2007). Umożliwia za to definiowanie afordancji na głębszym, bardziej abstrakcyjnym poziomie, pozwalającym na ścisły, ilościowy opis szeregu istotnych z punktu widzenia psychologii ekologicznej zjawisk, w tym na określanie stopnia nasycenia znaczeniem środowiska (współczynnik semantyczności η) z punktu widzenia danego organizmu. Otwiera też możliwość systematycznego wykrywania afordancji i związanych z nimi konfiguracji właściwości układu organizm–środowisko w skomplikowanych systemach, w których zbiór dostępnych afordancji może być trudny do określenia *a priori*. Dodatkowo powiązanie afordancji z pojęciem informacji semantycznej i procesem maksymalizacji możliwości może być ciekawym punktem wyjścia do rozważań nad inteligencją z perspektywy ekologicznej.

Praktyczna przydatność przedstawionego podejścia w badaniach empirycznych i analizach modeli teoretycznych pozostaje na razie pytaniem otwartym. Proponowaną formalizację prawdopodobnie należy jeszcze udoskonalić. Przedstawiony przykład pokazuje jednak, że nawet w obecnej postaci pozwala ona na szczegółową analizę układów organizm–środowisko, przynajmniej w przypadku prostych dyskretnych systemów. Jednocześnie generyczny matematyczny charakter formalizacji, w którym wymagany jest jedynie dostęp do rozkładu łącznego właściwości układu organizm–środowisko i stanów organizmu, oznacza, że przedstawione podejście i metody można zastosować do każdego systemu, który da się przedstawić w odpowiedniej postaci.

9. Podsumowanie

W pracy wprowadzono nowy sposób formalizacji pojęcia afordancji wraz z metodami obliczeniowymi, które pozwalają na ilościową analizę szeregu ważnych zjawisk i problemów. Między innymi możliwe jest systematyczne wykrywanie afordancji oraz związanych z nimi konfiguracji właściwości układu organizm–środowisko oraz określanie znormalizowanego współczynnika określającego stopień, w którym środowisko nasycone jest afordancjami z punktu widzenia danego organizmu. Przedstawione podejście wprowadza rygor współczesnej matematyki do rozważań na temat afordancji. Jednocześnie, jako oparte na pojęciach entropii i informacji semantycznej, pokazuje, że psychologia ekologiczna może być, przynajmniej do pewnego stopnia, połączona z teorią informacji.

Bibliografia

- Aitken, A. C. (1933). A Problem in Combinations. *Mathematical Notes*, 28, xviii–xxiii. <https://doi.org/10.1017/S1757748900002334>
- Bateson, G. (1978). Form, substance and difference. W: *Steps to an Ecology of Mind* (7. wyd., s. 448–464). Ballantine Books.
- Chemero, A. (2003). An Outline of a Theory of Affordances. *Ecological Psychology*, 15(2), 181–195. https://doi.org/10.1207/S15326969ECO1502_5
- Cover, T. M. i Thomas, J. A. (2006). *Elements of information theory* (2nd ed). Wiley-Interscience.
- Franchak, J. i Adolph, K. (2014). Affordances as Probabilistic Functions: Implications for Development, Perception, and Decisions for Action. *Ecological Psychology*, 26(1–2), 109–124. <https://doi.org/10.1080/10407413.2014.874923>
- Gibson, J. J. (1960). The concept of the stimulus in psychology. *American Psychologist*, 15(11), 694–703. <https://doi.org/10.1037/h0047037>
- Gibson, J. J. (1979). *The Ecological Approach to Visual Perception: Classic Edition*. Psychology Press. <https://doi.org/10.4324/9781315740218>
- Heft, H. (2001). *Ecological Psychology in Context: James Gibson, Roger Barker, and the Legacy of William James's Radical Empiricism*. Psychology Press. <https://doi.org/10.4324/9781410600479>
- Jacobs, D. M. i Michaels, C. F. (2007). Direct learning. *Ecological Psychology*, 19(4), 321–349. <https://doi.org/10.1080/10407410701432337>
- Kolchinsky, A. i Wolpert, D. H. (2018). Semantic information, autonomous agency and non-equilibrium statistical physics. *Interface Focus*, 8(6), 20180041. <https://doi.org/10.1098/rsfs.2018.0041>
- Lin, J. (1991). Divergence Measures Based on the Shannon Entropy. *IEEE Transactions on Information Theory*, 37(1), 145–151. <https://doi.org/10.1109/18.61115>
- Lissowski, G., Haman, J. i Jasiński, M. (2008). *Podstawy Statystyki dla Socjologów*. Wydawnictwo Naukowe SCHOLAR.
- Michaels, C. F. i Carello, C. (1981). *Direct perception*. Prentice-Hall.
- Shannon, C. (1948). A Mathematical Theory of Communication. *Bell System Technical Journal*, 27(3), 379–423.
- Timm, N. H. (2002). *Applied multivariate analysis*. Springer.
- Turvey, M. T. (1992). Affordances and prospective control: An outline of the ontology. *Ecological Psychology*, 4(3), 173–187. <https://doi.org/173-187>
- Turvey, M. T. i Shaw, R. E. (1995). Toward an Ecological Physics and a Physical Psychology. *The Science of the Mind: 2001 and Beyond*, 144–169.
- van der Kamp, J., Savelsbergh, G. J. P., & Davis, W. E. (1998). Body-scaled ratio as a control parameter for prehension in 5- to 9-year-old children. *Developmental Psychobiology*, 33(4), 351–361. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1098-2302\(199812\)33:4<351::AID-DEV6>3.0.CO;2-P](https://doi.org/10.1002/(SICI)1098-2302(199812)33:4<351::AID-DEV6>3.0.CO;2-P)

- Warren, W. H. (1984). Perceiving Affordances: Visual Guidance of Stair Climbing. *Journal of Experimental Psychology*, 10(5), 683–703.
- Wissner-Gross, A. D. i Freer, C. E. (2013). Causal Entropic Forces. *Physical Review Letters*, 110(16). <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.110.168702>

Affordances and semantic information: a proposal for formalization

Abstract

Notions of affordances and information are crucial elements of Gibsonian ecological psychology. They are also directly linked since from the vantage point of a goal-oriented organism functioning in an environment information specifying available actions is of first-rate importance. At the same time it is usually assumed that mathematical theory of information cannot be applied to ecological psychology, because it does not provide appropriate tools for modeling meaning and value, that is, all those things that are important from the vantage point of an organism. In other words, it is accused of inability to capture ecological semantics.

In this paper I show that novel ideas from information theory and especially the notion of semantic information can be used to formulate a rigorous and formal definition of affordances. This result not only enriches ongoing discussions on formal definitions and ontology of affordances, but also has a range of practical implications. Proposed formalization, due to its quantitative and generic form, allows for systematic detection of relations between features of organism and environment that generate affordances in arbitrary organism-environment systems as well as normalized quantitative measurement of the degree to which an environment is filled with affordances from the vantage point of a given agent. Computational methods for conducting such analyses are illustrated based on a simple, idealized organism-environment system.

Keywords: affordance; information; semantic information; mutual information; entropy; information theory; ecological psychology; semantics

Szymon Talaga – doktorant w Instytucie Nauk Społecznych im. Roberta Zająca na Uniwersytecie Warszawskim (promotor: prof. Andrzej Nowak). Strona internetowa autora: <http://iss.uw.edu.pl/en/szymon-talaga>

Redakcję i publikację tekstu sfinansowano ze środków Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego na działalność upowszechniającą naukę (DUN), działalność wydawnicza, nr umowy: 711/P-DUN/2019, okres realizacji: 2019–2020.