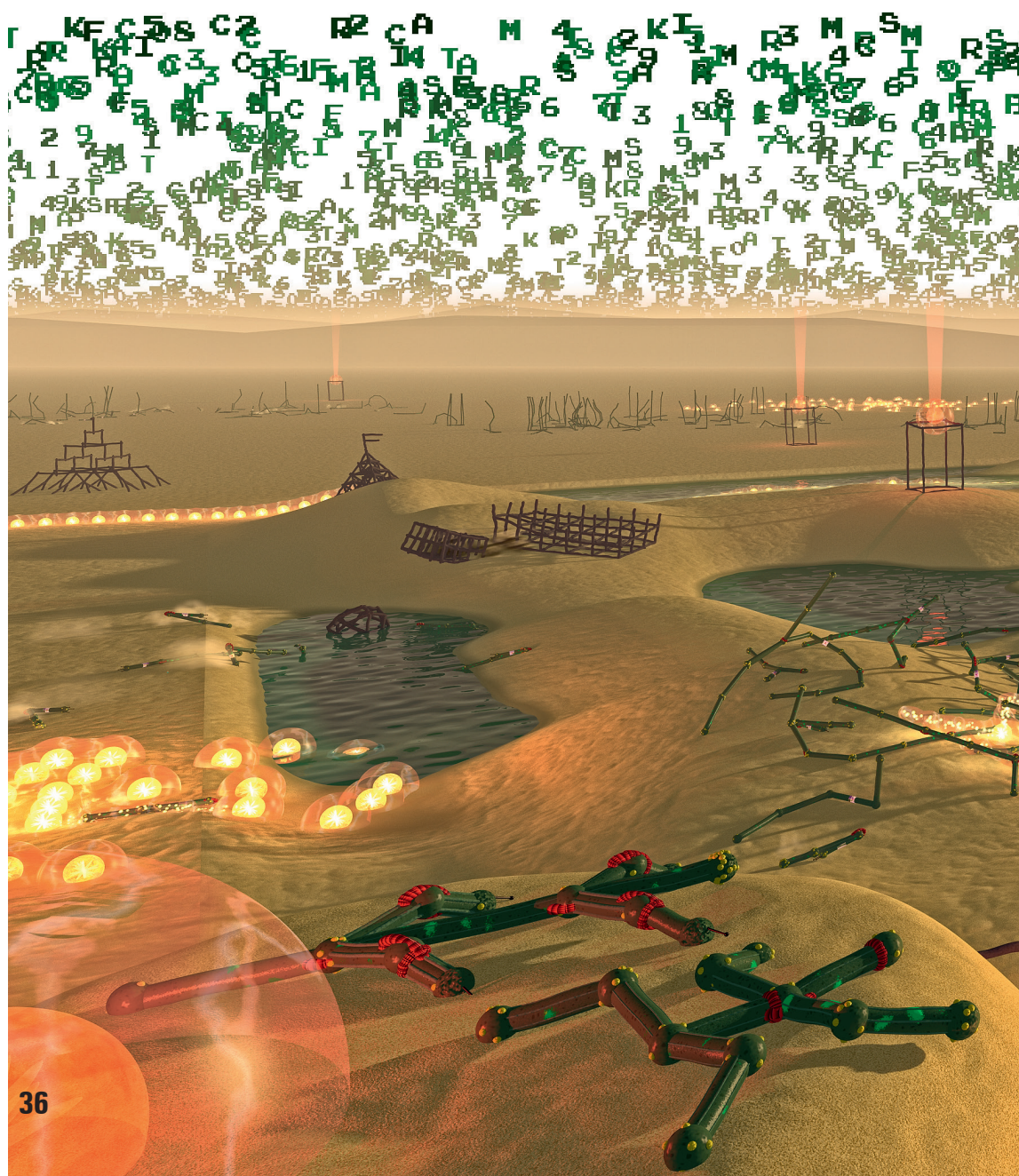


# CZUŁOŚĆ W INFORMATYCE

Czyli o różnych znaczeniach tego słowa:  
od przyziemnych, technicznych, przez znaczenia  
charakterystyczne dla statystyki i uczenia maszynowego,  
aż po znaczenie analogiczne do ludzkiego,  
związanego z uczuciami i emocjami.



## Maciej Komosiński

Instytut Informatyki, Politechnika Poznańska

**R**ozważając znaczenie słowa „czułość”, trzeba na początku zaznaczyć, że choć samo słowo jest w informatyce stosowane, to zwykle w zupełnie innym znaczeniu niż potocznie używana, ludzka czułość. Można tu mówić o analogiach – czułość algorytmu, metody lub urządzenia i czułość człowieka – jednak ta analogia dotyczy raczej fizycznej czułości człowieka, czyli jego wrażliwości na proste bodźce, niż uczuć. Podobnie jest np. w fotografii, gdzie możemy mówić o czułości filmu lub czułości sensora kamery, oraz w fizyce, gdzie mamy różne urządzenia pomiarowe charakteryzujące się określoną czułością, czyli zdolnością do odbierania i rejestrowania sygnałów o określonej wielkości (im wyższa czułość, tym słabsze lub mniej różniące się sygnały jesteśmy w stanie odbierać – mamy wyższą rozdzielczość pomiarową).

Pod koniec tego eseju podam jednak przykład takiej czułości w informatyce, która będzie zaskakująco bliska tej czułości ludzkiej, która dotyczy emocji i uczuć. Tymczasem zaczniemy od typowego znaczenia słowa „czułość” w technice i naukach ścisłych.

### Czułość „techniczna”

W sensie technicznym czułość jest rozumiana jako wrażliwość (ang. *sensitivity*), czyli to, jak bardzo zmiany sygnałów wejściowych wpływają na wartości sygnałów wyjściowych. Ta definicja pasuje zarówno do błony fotograficznej (wejście: światło, wyjście: reakcja chemiczna), sensora w matrycy kamery cyfrowej (wejście: światło, wyjście: napięcie elektryczne), algorytmu (wejście: dane wejściowe, wyjście: dane wyjściowe), jak i do robota (wejście: sygnały z czujników, wyjście: sterowanie efektorami, czyli zachowanie robota), a tym samym do wielu innych urządzeń i mechanizmów.

Skoro na powyższej liście pojawił się algorytm – procedura przekształcająca dane wejściowe w wyjściowe – można by w tym miejscu podać niezliczone przykłady konkretnych algorytmów, które mogą być mniej lub bardziej „czułe”. Co więcej, czułość może dotyczyć nie tylko danych wyjściowych, lecz także zachowania samego algorytmu – choćby czasu jego działania lub pamięci, której algorytm potrzebuje. Przykładowo, różne algorytmy sortujące liczby mogą być mniej lub bardziej czułe (wrażliwe) na to, jaki ciąg liczb dostaną jako dane wejściowe do posortowania. Jeden algorytm sortujący może zawsze działać

przez podobną ilość czasu i wykorzystywać podobną ilość pamięci niezależnie od tego, jaka sekwencja liczb o ustalonej długości zostanie mu przekazana do posortowania. Powiemy wtedy, że ten algorytm nie jest czuły na dane wejściowe – to, jakie one są, nie robi na nim wrażenia. Inny algorytm może wymagać więcej czasu i pamięci, żeby posortować dane nieuporządkowane, a jeśli każemy mu posortować liczby, które są już prawie posortowane, zrobi to dużo szybciej i zużyje mniej pamięci. Powiemy, że taki algorytm jest czuły na dane wejściowe (zob. tabela 1). Zwróćmy uwagę, że ostateczne rezultaty obu tych algorytmów są identyczne, więc w tym konkretnym przypadku różnica tkwi w sposobie ich działania, a nie w efekcie ich pracy – od typowego algorytmu sortującego wymagamy, by jego wynik był zawsze idealny.

Tabela 1.

Ilustracja „czułości” (wrażliwości) algorytmu sortowania na specyfikę danych.  
Podane czasy są przykładowe

Lista do posortowania	Czas działania algorytmu „czułego”	Czas działania algorytmu „nieczułego”
[1, 3, 2, 4, 5, 6, 7]	3 $\mu$ s	17 $\mu$ s
[3, 7, 6, 1, 2, 5, 4]	14 $\mu$ s	17 $\mu$ s

Szczególnym przypadkiem czułości rozumianej jako zmiany danych wyjściowych w reakcji na zmiany danych wejściowych jest analiza wrażliwości stosowana w optymalizacji. Najpierw pytamy, jakie wartości parametrów jakiegoś procesu dadzą nam najwyższy zysk lub najmniejszy koszt. Kiedy już uzyskamy odpowiedź na to pytanie, nie poprzestajemy na tym – pytamy dalej, w jakich granicach może się zmieniać charakter naszego oryginalnego problemu, żeby rozwiązanie, które odkryliśmy, pozostało ciągle optymalne. W ten sposób sprawdzamy, jak czułe jest rozwiązanie optymalne na zmiany pierwotnie postawionego problemu. Dzięki temu wiemy, czy i jakie zmiany warunków (np. zmiana kosztów produkcji, ceny potrzebnych półproduktów, wartości wynagrodzeń, liczba pracowników) zmienią zysk z rozwiązania, które wyznaczyliśmy i zamierzamy realizować.

Innym praktycznym przykładem niech będzie algorytm autoryzacji, sprawdzający, czy podane hasło jest poprawne. Chcemy, by taki algorytm był nieczuły na to, czy podano hasło zupełnie niepoprawne, czy prawie poprawne (np. różniące się tylko jedną literką od prawidłowego). Dlaczego w tej sytuacji oczekujemy nieczułości? Bo gdyby taki algorytm zdradzał swoim zachowaniem to, jak bardzo podobne jest podane hasło do prawidłowego, włamywacze dokonujący przypadkowych prób haseł i obserwujący uważnie działanie algorytmu autoryzacji mieliby wskazówkę,



### dr hab. inż. Maciej Komosiński

Pracuje w Instytucie Informatyki Politechniki Poznańskiej, gdzie zajmuje się sztuczną inteligencją i budowaniem modeli sztucznego życia, symulacjami komputerowymi, ewolucją i teorią gier. Tworzy programy, m.in. środowisko Framsticks i symulator zeglowania Top Sailor. [maciej.komosiński@cs.put.poznan.pl](mailto:maciej.komosiński@cs.put.poznan.pl)

które z nich są bliżej prawidłowego hasła, i dzięki temu mogliby je dużo szybciej odgadnąć. Jest to znana technika łamania kodów, w przeszłości stosowana z powodzeniem.

Jeszcze innym przykładem znaczenia słowa „czułość” w informatyce jest określenie wrażliwości na niepoprawność danych wejściowych. Wyobraźmy sobie, że wypełniamy formularz na stronie internetowej, podając imię, nazwisko i kod pocztowy. Algorytm przetwarzający te dane może nie być odpowiednio zabezpieczony (odporny) i popełnić błąd lub przestać działać w sytuacjach, gdy podamy puste nazwisko, użyjemy w nim nietypowych znaków albo gdy w pole kodu pocztowego zamiast liczb wpisujemy litery. Podobnie jak w poprzednim przykładzie, tu również nie chcielibyśmy tego rodzaju wrażliwości lub czułości – oczekiwaliśmy raczej niewrażliwości i odporności na błędy w danych.

Czułość można też oceniać nie na konkretnych, deterministycznych przykładach, ale probabilistycznie – jako zakres niepewności w działaniu algorytmu (ogólniej systemu lub modelu), który propaguje się od wejść do wyjść. Wyobraźmy sobie algorytm przewidujący, jaka będzie jutro pogoda – temperatura, zachmurzenie, opady. Na wejście tego algorytmu podajemy dane historyczne oraz bieżące odczyty z różnych czujników meteorologicznych. Wiemy jednak, że te dane nie są idealnie precyzyjne. Pytamy więc: jak niepewność naszej prognozy zależy od stopnia niepewności danych wejściowych? Na ile możemy

się pomylić w prognozie, jeśli niepewność pomiarów wynosi 5%? Na ile nasz model pogody jest odporny i stabilny? Na takie pytania odpowie nam analiza wrażliwości na niepewność. Zwróćmy uwagę, że i ta probabilistyczna interpretacja słowa „czułość” jest bardzo pojemna: zamiast przewidywania pogody na podstawie pomiarów z czujników możemy wyobrazić sobie przewidywanie (niepewnych) zysków firmy w kolejnym kwartale na podstawie (nieprecyzyjnie podanej) dotychczasowej sprzedaży albo przewidywanie (niepewnych) osiągnięć sportowca na podstawie (nieokładnych) wyników badania jego wydolności.

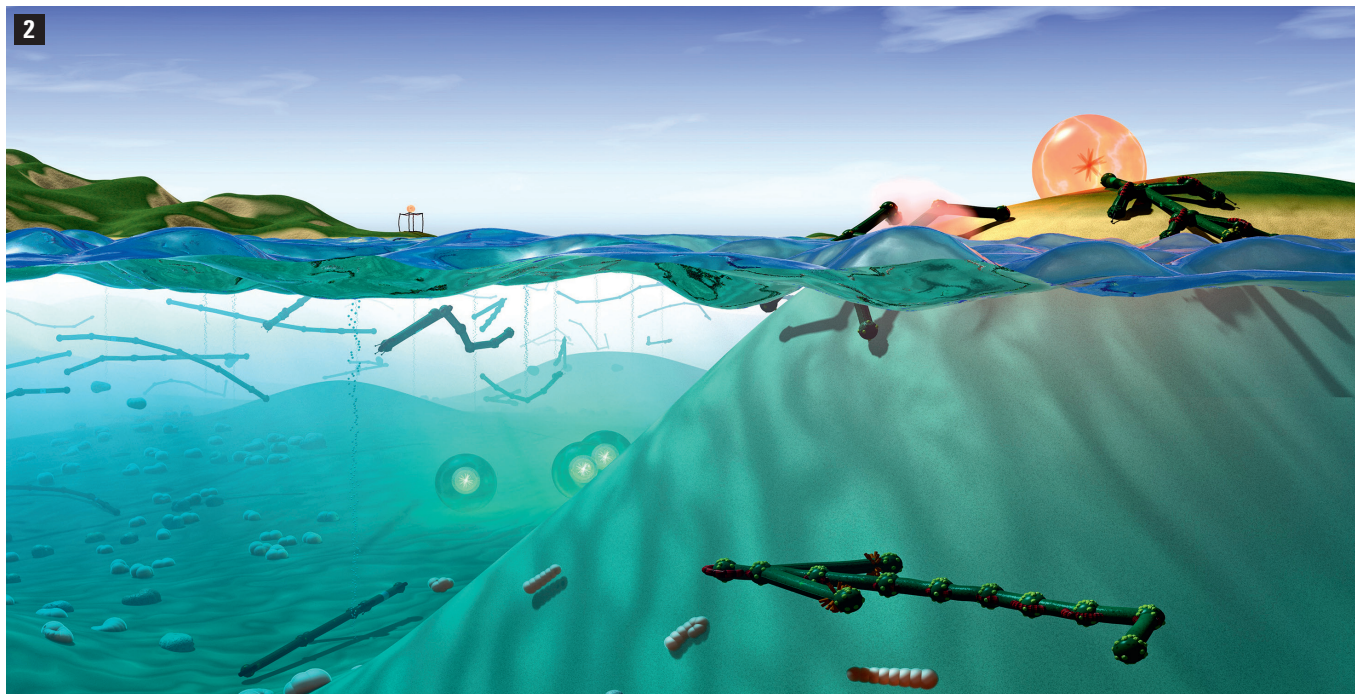
## Czułość „statystyczna”

W statystyce mówi się o czułości i swoistości – dwóch podstawowych cechach pozwalających oceniać jakość testu. Wyobraźmy sobie, że badamy, czy dana osoba choruje na boreliozę. Możemy sprawdzić obecność przeciwciał charakterystycznych dla tej choroby we krwi, jednak czy taki test zawsze je wykryje? Powiedzmy, że tak. Czy to oznacza, że mamy idealny test? Tak by się mogło wydawać, ale jest tu pewna pułapka: to, że wykryjemy przeciwciała w 100% przypadków, oznacza, że jeśli one są we krwi, to zawsze je wykryjemy. Nie powiedzieliśmy tu nic o sytuacji, kiedy przeciwciał we krwi nie ma. Jeśli nasz test mówiłby zawsze i bezwarunkowo „tak, są przeciwciała”, to zawsze by je wykrywał, kiedy tam faktycznie są, ale to byłby przecież beznadziejny test! Taki test miałby niską swoistość. Czułość z kolei uwzględnia nie tylko to, jak dobrze test wykrywa jedną z wielu sytuacji (tutaj: faktyczną obecność przeciwciał), lecz także to, jak często tę faktyczną sytuację uznaje za jakąś inną sytuację (tutaj: faktyczną obecność przeciwciał uznaje za ich brak). Innymi słowy, czułość testu mówi nam, jak często ten test przewiduje prawdziwy, dodatni wynik (czyli ma rację) w stosunku do wszystkich sytuacji, kiedy wynik jest faktycznie dodatni (zatem włączając w to również sytuacje, w których test się niestety myli, czyli jest fałszywie ujemny). W tym zastosowaniu „czułości” chcemy, żeby była ona jak największa, czyli żeby było jak najmniej sytuacji, w których test nie wykrywa przeciwciał, chociaż faktycznie one są we krwi.

W tym samym znaczeniu używa się słowa „czułość” przy ocenie algorytmów uczenia maszynowego, które najczęściej uczą się z danych pewnych pojęć (rys. 1) – np. uogólniają pojęcie nowotworu na podstawie zdjęć histopatologicznych, pojęcie pieszego na podstawie zdjęć z kamery samochodowej, pojęcie określonego gatunku ptaka na podstawie nagrań śpiewu, pojęcie radości na podstawie zdjęć twarzy, pojęcie upadającej firmy na podstawie danych finansowych, pojęcie zmęczonego kierowcy na podstawie jego reakcji na sytuacje drogowe, pojęcie choroby Alzheimera na podstawie liczności i różnorodności wypowiedzi

Rys. 1  
 Malutki fragment przykładowego zbioru danych obrazowych, na którego podstawie algorytm uczenia maszynowego nauczył się rozpoznawać owoce na zdjęciach





nych słów i tak dalej. W każdej z tych sytuacji jedną z miar jakości algorytmu predykcji jest jego czułość, którą chcemy maksymalizować. Niska czułość ma konkretne negatywne konsekwencje, które łatwo sobie wyobrazić dla każdego z wymienionych przykładów.

## Czułość w złożonych symulowanych środowiskach

Obiecałem na początku, że napiszę o takiej czułości w informatyce, która jest zdecydowanie bliższa tej ludzkiej, emocjonalnej i uczuciowej niż wyżej przedstawiona czułość techniczna i statystyczna. Żeby spotkać taką czułość, musimy udać się nieco dalej, wychodząc poza obszar prostych systemów informatycznych.

Najpierw wyobraźmy sobie, że ludzie poznają działanie mózgu ludzkiego na tyle, że są w stanie prowadzić jego wierną symulację. Czy w takim symulowanym mózgu byłoby miejsce na czułość? Jeśli zweryfikujemy, że do zaistnienia ludzkiej czułości wystarczy to, co potrafimy zasymulować, to odpowiedź będzie twierdząca. Zmieni się zatem tylko medium, w którym działa mózg, ale jego reakcje i procesy będą takie same lub analogiczne – można będzie bez istotnej utraty informacji zamapować (odzwierciedlić) zjawiska biochemiczne na zjawiska w tym medium, którego użyjemy do odtworzenia (zasymulowania) mózgu.

Dalej zastanówmy się, czy czułość jest fenomenem ograniczonym jedynie do ludzkiego gatunku. Myślę, że tu odpowiedzi dostarczają pozostałe artykuły tego numeru „Academii”. Jeśli odpowiedź jest negatywna, to tym prościej będzie zasymulować czułość innych gatunków. Kuszące jest uzależnienie istnienia czułości od istnienia świadomości, nie będą jednak w tym krótkim tekście rozwijał tego wątku, a zainteresowanych

odeślę do syntetycznego artykułu<sup>1</sup>, który w jednolity sposób formalizuje różne teorie świadomości oraz porusza temat jej obecności w symulacjach i obliczeniach sztucznego życia.

Wreszcie, wyobraźmy sobie skomplikowane środowisko symulowane na komputerze (rys. 2), gdzie istnieją pewne reguły, nazwijmy je fizycznymi – choć mogą być zbliżone do reguł naszego świata, mogą też być zupełnie inne. W takim środowisku może zachodzić proces ewolucji, która doprowadzi do spontanicznego powstawania tworów o rosnącej złożoności<sup>2</sup>. Może dojść do rozwoju komunikacji między tymi tworami, do wykształcenia się sygnałów o znaczeniach znanych tylko tym twórcom i dalej do wykształcenia języka. Możliwe jest również powstanie emocji, uczuć, zachowań, które będą wspólne dla tych tworów – i jednym z nich może być czułość. Ale czym ona by była? Wszakże „czułość” to słowo z naszego słownika, którego znaczenie definiujemy jako zespół zachowań, które my, ludzie, sami temu słowu przypisaliśmy. Podobnie i w takim symulowanym środowisku mogłaby zaistnieć jakaś manifestacja czułości, niekoniecznie identyczna z naszą, ludzką. Jeśli powstanie, symulowane organizmy będą wiedziały, czym ona jest. My z kolei będziemy mogli uznać ich pojęcie czułości i nasze pojęcie czułości za odpowiadające sobie, jeśli znajdziemy wystarczającą analogię – tak samo jak to przecież czynimy, mówiąc o czułości różnych gatunków ziemskich zwierząt.

<sup>1</sup> Błądek I., Komosiński M., Miazga K., *Mappism: formalizing classical and artificial life views on mind and consciousness*, „Foundations of Computing and Decision Sciences” 2019, t. 44 (1), s. 55–99, <http://www.framsticks.com/files/common/MappismConsciousness.pdf>.

<sup>2</sup> Komosiński M., *Zagnieżdżenie*, 2016, <http://www.framsticks.com/zagniezdzzenie>.

Rys. 2  
Przykładowa wizualizacja z programu Framsticks: złożone symulowane środowisko, w którym zachodzi ewolucja sztucznego życia