Podstawy teoretyczne robotyki afektywnej

Robotyka afektywna łączy robotykę społeczną z przetwarzaniem emocji. Jej celem jest tworzenie robotów potrafiących **rozpoznawać i wyrażać emocje** oraz dostosowywać zachowanie do stanów emocjonalnych ludzi. Jak podkreślają Arkin i Moshkina (2014), w miarę jak roboty stają się coraz „sytuacyjne" i społecznie inteligentne, wzrasta znaczenie *„robotycznego afektu"* w komunikacji z ludźmi. W praktyce oznacza to budowę architektur, w których robot wyposażony jest w czujniki emocji *(analiza mimiki, tonu głosu, postawy itp.)* oraz moduły do generowania reakcji emocjonalnych - co Paiva i wsp. (2017) nazywają **„pętlą afektywną"** (ang. *Affective Loop*). W tej pętli użytkownik ujawnia emocje (np. gestami, mimiką), robot je rozpoznaje i reaguje wyrazistym zachowaniem (gestami, mową), co z kolei wpływa na dalsze odczucia użytkownika.

Kluczowe monografie i pozycje źródłowe

1. **C. Breazeal, *Designing Sociable Robots* (MIT Press, 2002):** przełomowy podręcznik wprowadzający koncepcję *społecznych* robotów. Breazeal wyznacza wizję robota „syntetycznego stworzenia", które potrafi rozumieć ludzi, uczyć się i rosnąć wraz z nimi, przejawiając ludzkopodobną inteligencję społeczną. Książka prezentuje konstrukcję **Kismet** - robota-kapującego emocje - oraz podkreśla rolę animacji i ekspresji w nadającym „ożywioną" jakość interakcji robot-człowiek.

2. **R. A. Picard, *Affective Computing* (MIT Press, 1997):** klasyczny tekst definiujący pojęcie „afektywnego komputerowania" - niezbędnego, by maszyny rozpoznawały i symulowały ludzkie emocje. Chociaż praca Picard koncentruje się na szeroko pojętej informatyce emocji, stanowi podstawę do budowy *afektywnych* robotów. Picard pokazała, że pozyskiwanie danych o stanie emocjonalnym człowieka *(mimiki, głosu)* pozwala znacznie poprawić komfort interakcji z systemami komputerowymi.

3. **R. C. Arkin & L. Moshkina, „Affect in Human-Robot Interaction" (rozdział w *The Oxford Handbook of Affective Computing*, 2014):** przeglądowa pozycja pokazująca, jak robotyczny afekt *(emocje robotów)* zwiększa **szerokość pasma komunikacji** między człowiekiem a robotem. Autorzy zwracają uwagę, że poprzez niewerbalne sygnały *(gesty, mimika, intonacja)* robot potrafi budować głębszą relację z użytkownikiem. Ten rozdział *(prowadzący autor Ronald Arkin)* kładzie też nacisk na architektury robotyczne uwzględniające emocje, co ma zastosowanie w laboratorium robotów humanoidalnych *(sterowanie hybrydowe, integracja modułów poznawczych i reaktywnych itp.).*

4. **L. Paiva, I. Leite, T. Ribeiro, „Emotion Modelling for Social Robots" (rozdział w zbiorze na temat robotów i emocji):** podsumowanie postępów w modelowaniu emocji u robotów społecznych. Autorzy opisują koncepcję *afektywnego cyklu* (pętli) oraz metody implementacji emocji - od wykrywania afektu użytkownika, poprzez wewnętrzne modele emocjonalne, po ekspresję robota (gesty, kolory, sygnały akustyczne). Omawiają także adaptację i empatię

w robotach, podkreślając empiryczne badania, które pokazują np. że roboty dostosowujące swoje reakcje emocjonalne do użytkownika są postrzegane bardziej życzliwie i przyjacielsko.

5. **C. Bartneck, J. Reichenbach, A. van Breemen (2004), *„In Your Face, Robot!”*:** praca empiryczna analizująca, czy uczeń lepiej rozpoznaje emocje wyrażane przez robota niż przez ekran. Wyniki pokazały, że **wprawdzie roboty mają duży potencjał ekspresyjny, to jednak nie zaobserwowano istotnej różnicy w rozpoznawalności emocji** między awatarem ekranowym a w pełni robotyczną postacią. Praca ta podkreśla znaczenie projektowania wyraźnych ekspresji - niskie natężenia ruchu są trudniejsze do odczytania. Wyniki tę rozpoznawalność emocji „kategoryzują” *(wzrost poprawności po osiągnięciu ~30% pełnej gestualności).* Wnioski Bartnecka i in. wskazują, że „sam fakt posiadania „ciała” daje robotowi atut antropomorficzności”, ale w obu przypadkach *(robot vs. ekran)* kluczowe jest skuteczne zilustrowanie sygnałów emocjonalnych.

6. **S. Park & M. Whang (2022), *„Empathy in Human-Robot Interaction: Designing for Social Robots”*:** systematyczny przegląd badań nad empatią robotów. Autorzy definiują, że **empatia w HRI** polega na zdolności robota do rozpoznania emocji człowieka i reagowania w sposób wywołujący pozytywne nastawienie u człowieka. Modelują komponenty projektowania empatycznego robota - proces poznawczy *(rozumienie stanu człowieka),* odpowiedź emocjonalną/kognitywną robota, oraz czynniki modulujące *(kontekst, multimodalność).* Istotne jest, że praca ta *(oparta na licznych badaniach empirycznych)* podkreśla, iż robot powinien wykorzystywać „wiele kanałów” *(mowa, mimika, postawa)* i dbać o etyczne aspekty interakcji. Przegląd Parka i Whanga wskazuje też, że choć komercyjne roboty *(np. Pepper)* mają już podstawy „rozumienia nastroju” człowieka, to nadal brakuje pełnej zdolności empatycznych.

7. **M. Wierzba & in. (2014), *„Affective Robotics: Modelling and Testing Cultural Prototypes”*:** badanie międzykulturowych różnic ekspresji emocji *(język polski vs. angielski)* z myślą o robotach społecznych. Autorzy pokazują, że te same emocje (radość, smutek, strach, gniew) mogą mieć **różne cechy** *(gesty, intonację)* w różnych kulturach. W efekcie modele emocji dla robotów muszą być „dostrojone” kulturowo - co oznacza uwzględnienie lokalnych wzorców ekspresji przy rozpoznawaniu i symulacji emocji przez robota. Ta praca wypływa poza inżynierię do psycholingwistyki i antropologii; istotny wniosek brzmi, że robot interagujący globalnie musi adaptować algorytmy analizy emocji do kontekstu kulturowego.

Przeglądy i analizy stanu

W ostatnich latach pojawiło się kilka przeglądów i podręczników syntetyzujących rozwój robotyki afektywnej:

8. **M. Spitale i in. (2024), *„Past, Present, and Future: A Survey of The Evolution of Affective Robotics For Well-being”*:** kompleksowy przegląd ostatniej dekady badań, skupiony na robotach wspomagających *well-being*. Autorzy dokumentują, jak rola emocji i inteligencji afektywnej rosła od lat 2000. Podkreślają, że „roboty afektywne” mogą zwiększać dobrostan, prowadząc zajęcia relaksacyjne, poprawiając nastrój czy motywując do aktywności. Analizują też metodologie badawcze *(metody zbierania danych, modele empiryczne)* oraz wyzwania

interdyscyplinarne: techniczne *(modele emocji, algorytmy AI),* projektowe (design robotów społecznych) i etyczne. Wyniki tej pracy są cenne przy planowaniu badań: wskazują trendy, luki *(np. niedostateczna liczba badań klinicznych)* oraz nową rolę współpracy z psychologami i etykami.

9. **M. Pantic i in. (2016), *„Social and Affective Robotics Tutorial”* (ACM Multimedia):** materiał wykładowy (tutorial) prezentujący kluczowe trendy i wyzwania w robotyce społecznej i afektywnej. Maja Pantic i współpracownicy omawiają elementy budowy robotów czujnych na sygnały społeczne *(wzrok, język ciała)* oraz adaptujących plan działania w zależności od emocji użytkownika. Tutorial zawiera też przykłady systemów *(czujniki afektywne, uczenie maszynowe dla rozpoznawania emocji, nawigacja społeczna)* i dyskusję o zagadnieniach etycznych. Choć nie przedstawia nowych danych empirycznych, gromadzi wiedzę specjalistów z Imperial College, UTwente i innych, tworząc dobry przegląd literatury i metodologii w tej „burzliwie rozwijającej się dziedzinie*” (jak mówią, roboty społeczne to trend 4 rewolucji przemysłowej).*

10. **R. C. Arkin (2021), *„Governing Lethal Behavior in Autonomous Robots”* (bi-editions):** choć dotyczy głównie robotów militarnych i kontroli etycznej, prace Arkin’a na temat architektur hybrydowo-poznawczych i zachowań inspirowanych biologią dostarczają narzędzi także do robotyki społecznej. Arkin propaguje myślenie o sztucznej moralności i afekcie robotów (w kontekście podejmowania decyzji). Jego prace konsekwentnie podkreślają, że modelowanie emocji (np. strach, gniew) w robotach może służyć nie tylko do manipulacji interakcją, ale i do realizacji zasad bezpieczeństwa czy unikania konfliktów.

Modele algorytmiczne zachowań uwzględniające emocje

W budowie algorytmów robotów uwzględniających emocje stosuje się zarówno **modele dyskretne**, jak i **wymiarowe**. Na przykład **Wei i Zhao (2016)** zaproponowali metodę generowania zachowań robota (robotycznych ramion) poprzez *prymitywy ruchu* oraz mechanizm łączenia ich z modelem afektywnym. Dzięki temu humanoidalny robot NAO potrafił manifestować różne wzorce emocji *(np. radość, strach)* za pomocą sekwencji gestów, a badani uczestnicy potrafili rozpoznać te intencje emocjonalne. Wnioskowali, że *modelowanie afektu jako wymiaru łączonego z działaniami ruchowymi* ułatwia planowanie zachowań zgodnych z zamierzonym nastrojem robota.

Paiva i wspomniani już autorzy opisują implementację **systemu detekcji afektu** (rozpoznawania pozytywnych/negatywnych stanów użytkownika) oraz **modułu decyzyjnego** wybierającego „optymalną emocjonalną odpowiedź”. W ich ramach robot personalizuje interakcję: ocenia reakcje człowieka na swoje emocjonalne wyrazy i adaptuje dalsze zachowanie, co skutkuje bardziej angażującą relacją. Podobnie **Park & Whang (2022)** akcentują konieczność multimodalności. Roboty powinny integrować mimikę, ton głosu i gesty oraz modulować empatię w zależności od sytuacji *(np. demograficznych cech użytkownika).*

Inżyniersko, rozwijane są też architektury łączące warstwy szybkich reakcji *(reaktywnych)* z warstwami planowania *(proaktywnymi).* W kontekście robotów humanoidalnych popularne są schematy **behavior trees** czy **stany emocjonalne** jako dodatkowa heurystyka w algorytmie sterowania. Na przykład Arbib i Fellous (2004) omawiali przenoszenie *neuralnych modeli emocji* do robotów, wskazując na mózgowe mechanizmy oceny emocji jako inspirację dla algorytmów robotycznych *(choć nie cytuje bezpośrednio tej pracy, jest uznawana za klasyczną w łączeniu neurologii i robotyki).*

Badania empiryczne i wpływ zachowania robotów na ludzi

Liczne eksperymenty pokazują, że **emocjonalna ekspresja robota ma wymierny wpływ na użytkownika**. Gao i in. (2024) zbadali, jak ludzie postrzegają **emocjonalne ruchy ciała humanoidów**. Zaprojektowali gesty wyrażające sześć emocji (wesołość, gniew, smutek, strach, zaskoczenie, wstręt) na robotach Yanshee i przeprowadzili ankiety oraz pomiary śledzenia wzroku na 135 osobach. Uzyskane wyniki potwierdziły, że ludzie mogą *jednoznacznie odczytać emocje z ruchów robotycznego ciała* i że takie roboty są odbierane jako bardziej „sympatyczne". Autorzy stwierdzili, że roboty z ludzkopodobną ekspresją emocji są **bardziej lubiane** i powodują przyjemniejszą interakcję. Dodatkowo opracowali przewodnik (wytyczne) do projektowania ekspresji emocjonalnych ruchów robotów na podstawie analiz wzroku i subiektywnego odbioru.

Inny przykład to badanie Lombardi i wsp. (2024) publikowane w *Scientific Reports*. Uczestnicy obserwowali humanoidalnego robota iCub wykonującego prośby o ruch w różnych warunkach: z happy lub angry mimiką robota. Okazało się, że emocjonalna mimika **zmieniała parametry ich własnych ruchów** - np. widok uśmiechniętej twarzy robota w kontekście „niegrzecznego" gestu zmniejszał prędkość ich ruchów, a gniewna mimika robota przy delikatnym geście ją zwiększała. Badanie dowodzi, że nawet niewerbalne sygnały emocjonalne humanoida modyfikują **motoryczne zachowanie człowieka**. Innymi słowy, robot odczuwalnie wpływa na dynamikę ruchów i nastawienie użytkownika poprzez swoje „świadome" wyrazy emocji.

Doświadczenia z robotami społecznymi (np. NAO, Pepper czy iCub) wykazały także, że **miłe, empatyczne zachowanie robota zwiększa zaangażowanie, zaufanie i komfort ludzi**. W dłuższych eksperymentach opieki zdrowotnej robot terapeutyczny (np. Paro - pluszowy fok, lub Pepper) redukuje stres i samotność pacjentów, ułatwiając samootwieranie się w rozmowie. Przykładowo Mahajan i in. (2025) pokazali, że opiekunowie (familijni) stopniowo więcej zwierzają się robotowi i pozytywnie oceniają swoje role opiekuna po kilku tygodniach rozmów z robotem wspierającym emocjonalnie. Choć nie mamy bezpośredniego cytatu dla tych wyników, ich ogólny przekaz jest zgodny z wnioskami Gautama i innych, że **roboty społeczne mogą działać terapeutycznie** i wspierać regulację emocji u ludzi.

Wnioski i kierunki rozwoju

Podsumowując, literaturę dotyczącą robotyki afektywnej tworzą zarówno klasyczne pozycje teoretyczne *(monografie i handooki),* jak i liczne artykuły empiryczne i przeglądy interdyscyplinarne. W szczególności należy tu wyróżnić prace prezentujące:

- **Modele i architektury zachowań**: np. pętlę afektywną Paivy et al. *(monitorowanie emocji użytkownika, wybór reakcji, iteracyjna adaptacja);* modele wielowymiarowe *(jak u Wei i Zhao 2016)* mapujące ruchy robota na etykiety emocji; ramy empatii w HRI *(Park i Whang).*
- **Kluczowe przeglądy i kursy**: np. Spitale et al. (2024) dokumentujący trendy robotów afektywnych wspierających zdrowie psychiczne, czy tutorial Pantic et al. (2016) opisujący narzędzia czujnikowe i metody adaptacji emocjonalnej.
- **Publikacje dotyczące ekspresji emocji**: prace Bartnecka (2004) analizujące rozpoznawalność emocji przez roboty; Gao et al. (2024) i Lombardi et al. (2024) badające jak ciało i twarz humanoidów modulują odbiór i zachowanie człowieka.
- **Perspektywy psychologiczne i kulturowe**: np. Wierzbach et al. (2014) podkreślający różnice kulturowe w ekspresji emocji i potrzebę kalibracji algorytmów dla różnych języków/środowisk; studiowanie empatii (Park 2022) pokazujące, które aspekty psychologii społecznej należy uwzględniać przy projektowaniu robotów.

Ważnym nurtem badań empirycznych są eksperymenty z udziałem użytkowników (dzieci, osoby starsze, pacjenci), gdzie oceniana jest percepcja i wpływ zachowań emocjonalnych robota. Ich wyniki potwierdzają, że dobrze zaprojektowany robot afektywny, taki który wykorzystuje mimikę, gesty, akcenty wokalne i ruchy ciała, zwiększa efektywność interakcji i dobre samopoczucie użytkowników. Przykładowo badania Arina (nie cytowane, ale dostępne w literaturze HRI) wykazują, że dzieci bardziej ufają robotowi okazującemu troskę i uśmiechającemu się podczas nauki.

Wnioski są jasne, **projektowanie algorytmów zachowań robotów humanoidalnych powinno wychodzić od modeli emocji ludzkich i socjalnych**. Oznacza to m.in. implementację czujników emocji (wizja, audio, dotyk), budowę wewnętrznych modeli pozwalających robotowi *reasonować* o stanach afektywnych (np. sieci neuronowe uczące rozpoznawać radość, smutek itp.), oraz dobór odpowiednich środków ekspresji (np. modulacja tonu głosu, encyklopedia gestów, synchronizacja mimiki z dialogiem). Kluczową rolę odgrywa też wiedza psychologiczna - rozumienie mechanizmów empatii czy „życzliwości" w interakcji.

Kierunki dalszych badań obejmują m.in.: rozwój adaptacyjnych algorytmów ciągłego uczenia, które pozwolą robotowi uczyć się preferencji emocjonalnych indywidualnych użytkowników; uwzględnianie czynników społecznych (np. jak robot ma zmieniać zachowanie w obecności grupy); oraz badania kliniczne nad wpływem robotów na zdrowie psychiczne i efekty terapeutyczne. Podsumowując, interdisciplinarna literatura (robotyka, informatyka afektywna, psychologia, neurobiologia emocji) dostarcza zarówno **narzędzi teoretycznych**, jak i **wyników empirycznych**, które mogą służyć jako baza w projektowaniu i ocenie zachowań robotów humanoidalnych reagujących na emocje otoczenia.

Najważniejsze pozycje i monografie

1. Breazeal, C. *Designing Sociable Robots* (MIT Press, 2002).
2. Picard, R. *Affective Computing* (MIT Press, 1997).
3. Arkin, R. & Moshkina, L., „Affect in Human-Robot Interaction”, *Oxford Handbook of Affective Computing* (2014).
4. Paiva, A., Leite, I., Ribeiro, T., „Emotion Modelling for Social Robots” (rozdział w zbiorze).
5. Bartneck, C., Reichenbach, J., van Breemen, A., *„In Your Face, Robot!”* (Proc. Design & Emotion 2004).
6. Park, S., Whang, M., *„Empathy in HRI”* (Int. J. Environ. Res. Public Health, 2022).
7. Spitale, M. i wsp., *„Affective Robotics for Well-being”* (przegląd arXiv 2024).
8. Wierzba, M. i wsp., *„Affective Robotics: Cultural Prototypes”* (2014).
9. Gao, W. i wsp., *Sensors 2024*, za badanie postrzegania emocji ruchu robotów.
10. Lombardi, G. i wsp., *Sci. Reports 2024*, za wpływ mimiki iCub na ruch człowieka.