Trendy i wyzwania naukowe

związane z robotami humanoidalnymi

dr inż. Mateusz Pomianek

Plan prezentacji

1. **I. Wprowadzenie i kontekst**
   Definicje, historia, aktualny stan rynku
2. **II. Architektura i inżynieria**
   Mechanika, AI, percepcja, lokomocja, manipulacja
3. **III. Wyzwania badawcze**
   Interakcja HRI, bezpieczeństwo, energia, materiały
4. **IV. Zastosowania przemysłowe**
   Przemysł, medycyna, przestrzeń kosmiczna
5. **V. Wymiar ekonomiczny i regulacyjny**
   Rynek globalny, inwestycje, regulacje
6. **VI. Perspektywy i rekomendacje**
   Prognozy, rekomendacje, podsumowanie

Definicja i klasyfikacja robotów humanoidalnych

Definicja: Robot humanoidalny to autonomiczny lub semiautonomiczny system mechaniczny zaprojektowany tak, aby morfologicznie i funkcjonalnie naśladować strukturę i zachowanie człowieka: posiadający dwunożny układ lokomocyjny, manipulatory kończyn górnych oraz systemy percepcji analogiczne do zmysłów ludzkich.

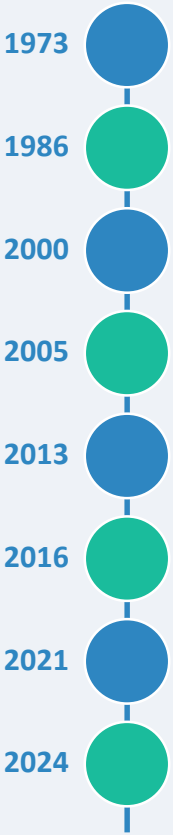
Typy robotów humanoidalnych

- Roboty w pełni humanoidalne (np. Honda ASIMO, Boston Dynamics Atlas)
- Androidy: maksymalna mimikra wyglądu człowieka (Sophia, Ameca)
- Roboty humanopodobne: częściowe podobieństwo morfologiczne
- Koboty humanoidalne: współpraca z człowiekiem w linii produkcyjnej

Kryteria klasyfikacji

- Lokomocja: dwunożna, kołowo-nożna, hybrydowa
- Autonomia: teleoperated / semiautonomiczne / w pełni autonomiczne
- Środowisko: przemysłowe, medyczne, domowe, badawcze
- Źródło zasilania: elektryczne (bateryjne, przewodowe), hydrauliczne

Rys historyczny i kamienie milowe



1973 WABOT-1 (Waseda Univ.): pierwszy w pełni zintegrowany robot humanoidalny

1986 Honda rozpoczyna program P-Series (prototypy bipedalne)

2000 Honda ASIMO: przełom w dynamicznej lokomocji dwunożnej

2005 Boston Dynamics BigDog; Aldebaran NAO: platforma badawcza

2013 DARPA Robotics Challenge: ocena robotów w środowisku awaryjnym

2016 Boston Dynamics Atlas: backflip; Han jako android publiczny

2021 Tesla Optimus, Agility Robotics Digit: komercjalizacja robotów pracy

2024 Figure 01, 1X Neo, Unitree H1: masowa globalna ekspansja rynkowa

Aktualny stan globalnego rynku robotów humanoidalnych

$2,4 mld
wartość rynku (2024)
szacunki: Goldman Sachs Research

~38%
CAGR 2024–2030
prognoza: MarketsandMarkets

>50
aktywnych projektów
start-upy + korporacje

$38 mld
prognoza 2035
Goldman Sachs, 2024

Wiodące podmioty rynkowe (2024–2025)

Boston Dynamics (Hyundai)	**Atlas**: zaawansowana lokomocja i manipulacja; platforma badawczo-przemysłowa
Tesla Inc.	**Optimus Gen** 2: cel: produkcja masowa (<20k USD); integracja z FSD AI
Figure AI	**Figure 01/02**: partnerstwo BMW; OpenAI LLM jako moduł kognitywny
Agility Robotics (Amazon)	**Digit**: wdrożony w centrach logistycznych Amazona (2024)
Unitree Robotics	**H1/G1**: robot badawczy wyceniony poniżej 90 tys. USD; otwarta platforma
1X Technologies (OpenAI)	**NEO**: koncentracja na bezpiecznej AI dla środowisk domowych

Wiodące ośrodki badawcze i akademickie

Europa i Ameryka Północna

- **MIT CSAIL**: algorytmy planowania ruchu i percepcji
- **Carnegie Mellon University**: robotics institute, lokomocja
- **ETH Zürich**: ANYmal, legged robotics, reinforcement learning
- **Stanford Human-Centered AI Institute**: etyka i HRI
- **Georgia Tech**: robotyka kognitywna i interakcja społeczna
- **DLR (Niemcy):** TORO, manipulatory kosmiczne
- **CNRS / LAAS (Francja):** planowanie ruchu, optymalizacja

Azja i Polska

- **Waseda Univ. (Japonia):** tradycja WABOT, roboty muzyczne
- **KAIST (Korea):** HUBO, zwycięzca DARPA Robotics Challenge
- **IIT Genova: iCub**: platforma open-source do nauki
- **Politechnika Warszawska**: lokomocja i haptyka (PL)
- **AGH Kraków**: systemy sterowania i sensoryki (PL)
- **AIST (Japonia):** HRP-series, interakcja z człowiekiem
- **Beijing Institute of Technology**: BHR series (CN)

Polska dysponuje kompetentnym potencjałem badawczym: priorytetem jest budowa konsorcjów z wiodącymi ośrodkami europejskimi i pozyskanie finansowania w ramach Horizon Europe.

II. Architektura i inżynieria

Kluczowe podsystemy robota humanoidalnego

Mechanika i systemy napędowe

Technologie napędowe

- Aktuatory elektryczne (silniki BLDC + przekładnie harmoniczne): precyzja, cicha praca, integracja z enkoderem
- Aktuatory hydrauliczne: wysoka gęstość mocy, sterowanie siłowe (SEA); stosowane w Atlas (BD)
- Elastic Actuators (SEA/VSA): kompliancja mechaniczna kluczowa dla bezpiecznej interakcji z ludźmi
- Sztuczne mięśnie (SMA, pneumatyczne): naśladownictwo

Kinematyka i konstrukcja

- Kinematyka: 32–60 DOF (stopni swobody) w pełnych platformach humanoidalnych
- Projektowanie szkieletu: aluminium lotnicze, tytan, polimery wysokowytrzymałościowe (PEEK)
- Tolerancja obciążeń: moment statyczny > 200 Nm w stawach biodrowych
- Dłonie wielopalcowe: 20+ DOF, pomiar sił z rozdzielczością < 0,1 N

Sztuczna inteligencja w robotach humanoidalnych

Percepcja i rozumienie

- **Sieci konwolucyjne** (CNN) do klasyfikacji obiektów
- **Visual Language Models** (VLM): opis sceny 3D
- **Fuzja danych**: LiDAR + kamera głębokości + IMU
- **Wykrywanie intencji ludzkich** (Action Recognition)

Planowanie i podejmowanie decyzji

- **Hierarchiczne planowanie zadań** (HTN)
- **Reinforcement Learning** (PPO, SAC) w środowiskach sim-to-real
- **Duże Modele Językowe** (LLM) jako moduł dialogowy
- **Model Predictive Control** (MPC) dla lokomocji

Uczenie i adaptacja

- **Imitation Learning**: uczenie z demonstracji człowieka
- **Meta-learning**: szybkie dostosowanie do nowych zadań
- **Continual Learning**: brak zapominania katastroficznego
- **Foundation Models** dla robotyki (RT-2, π0, GR-1)

II-B. Wbudowana AI i autonomiczni agenci

Edge AI · LLM w robotyce · Multi-agent Systems · Foundation Models

Wbudowana sztuczna inteligencja (Edge AI) w robotach humanoidalnych

Edge AI: wykonywanie wnioskowania (inference) modeli AI bezpośrednio na procesorze robota: bez konieczności przesyłania danych do chmury. Kluczowe dla autonomii operacyjnej, latencji <5 ms i prywatności danych przetwarzanych w środowisku człowieka.

Sprzęt i architektury obliczeniowe

- Neural Processing Units (NPU): NVIDIA Jetson Orin (275 TOPS), Qualcomm RB3, Google Edge TPU: wnioskowanie AI bez chmury, bezpośrednio w jednostce sterującej robota
- Neuromorphic computing: Intel Loihi 2, IBM NorthPole: architektura inspirowana korą mózgową; zużycie energii 100× niższe niż GPU przy porównywalnej przepustowości
- Kwantyzacja (INT8/INT4): redukcja rozmiaru modelu o 75% przy spadku dokładności <2%; TinyML: modele <1 MB na mikrokontrolerach ARM Cortex dla reflexów ochronnych
- Federacyjne uczenie (Federated Learning): synchronizacja wiedzy między flotą robotów bez centralizacji danych: zgodność z RODO/GDPR

Algorytmy i implementacje

- SLAM on-device: lokalizacja i mapowanie 3D w czasie rzeczywistym: ORB-SLAM3, LIO-SAM; latencja <20 ms na Jetson AGX Orin; brak zależności od GPS
- Reactive control layer: sieci neuronowe reagujące na kolizje w <1 ms: warstwa niezależna od planera wyższego rzędu; kluczowa dla bezpieczeństwa kontaktu
- Wyzwanie termiczne: GPU/NPU generują 15–65 W; zarządzanie temperaturą jako ograniczenie projektowe w kompaktowych torsach
- Digital Twin AI: lokalny model cyfrowy środowiska: predykcja następnego stanu bez opóźnienia sieciowego; NVIDIA Omniverse Isaac

Duże Modele Językowe (LLM) jako moduł kognitywny robota



Modele VLA i architektura

- SayCan (Google, 2022): LLM wyznacza cele wysokopoziomowe; model wartości (affordance) określa wykonalność czynności przez konkretnego robota: pionierskie połączenie LLM z kontrolerem
- RT-2 (Robotics Transformer 2, Google DeepMind 2023): end-to-end VLA: model wizyjno-językowy przetwarza obraz + polecenie i generuje tokeny sterowania silnikami bez pośrednich warstw
- π0 (Physical Intelligence, 2024): flow matching + VLA; wytrenowany na 10 000+ godzinach danych teleoperacji; transfer zero-shot na nowe zadania bez dotrenowania
- OpenVLA (Berkeley, 2024): open-source VLA; 7B parametrów, uruchamiany na GPU klasy konsumenckiej (RTX 4090)

Wyzwania implementacyjne

- Prompt engineering dla robotyki: dekompozycja zadań złożonych: LLM jako planer, specjalistyczne modele jako executory; hierarchia TASK→SUBTASK→PRIMITIVE
- Grounded generation: model musi 'widzieć' scenę przez kamerę i potwierdzać fizykalne ograniczenia: kluczowe dla bezpieczeństwa (brak halucynacji motorycznych)
- Latencja vs. jakość: GPT-4o (~300 ms round-trip) nie nadaje się do sterowania reaktywnego; lokalne modele 3B–7B (<50 ms): kompromis konieczny
- Wyzwanie: halucynacje LLM w kontekście robotycznym mogą prowadzić do kolizji fizycznych: wymóg warstwy weryfikacyjnej (safety monitor)

Autonomiczni agenci AI w systemach robotycznych

Agent AI: system zdolny do autonomicznego postrzegania środowiska, formułowania celów, planowania sekwencji działań i wykonywania ich z pętlą sprzężenia zwrotnego: bez ciągłej ingerencji człowieka. W robotyce humanoidalnej agenty działają zarówno na poziomie jednostkowym, jak i w kooperujących sieciach robotów.

Cykl percepcja–decyzja–działanie

- Observe–Orient–Decide–Act (OODA Loop) jako formalizm agentowy
- Ciągła aktualizacja mapy środowiska (world model) na podstawie nowych obserwacji sensorycznych
- Planowanie probabilistyczne: POMDP (Partially Observable MDP) dla środowisk z niepewnością
- Temporal abstraction: hierarchia opcji (options framework): plany wielokrokowe

LLM-based Agentic Frameworks

- ReAct (Reason+Act): LLM generuje łańcuchy myślowe (CoT) i wywołuje narzędzia API; zastosowanie w robotyce manipulacyjnej
- AutoGen / LangGraph: orkiestracja wielu agentów LLM w potoku; Agent-A planuje, Agent-B weryfikuje bezpieczeństwo
- Voyager (Nvidia, 2023): samouczący się agent (Minecraft): iteracyjne generowanie kodu jako umiejętności
- RoboAgent (CMU, 2023): 12 umiejętności bazowych → 38 zadań przez semantyczne generalizowanie

Multi-Agent Robot Systems

- Swarm Intelligence: koordynacja floty robotów przez protokoły negocjacji zadań (Contract Net Protocol)
- Collaborative manipulation: 2+ roboty humanoidalne wspólnie przenoszące obiekty > 100 kg: synchronizacja impedancji
- Komunikacja agentów: ROS 2 DDS, Agent Communication Language (ACL); latencja <10 ms w sieci lokalnej
- Emergent behavior: zachowania zbiorowe wyłaniające się bez centralnego koordynatora: temat aktywnych badań (ETH, MIT)

Foundation Models dla robotyki: stan i perspektywy

RT-2

Google DeepMind (2023) | 55B parametrów

Pierwszy end-to-end Visual Language Action model; tokenizacja akcji robota jak tokeny językowe; generalizacja zero-shot na nowe obiekty i polecenia

π0 (pi-zero)

Physical Intelligence (2024) | 3B+ parametrów

Flow matching dla ciągłej kontroli; wytrenowany na danych z wielu typów robotów; benchmark: 70%+ success rate na zadaniach z tkaninami

GR-1

Shanghai AI Lab (2024) | 130M parametrów

GPT-like architektura dla robotyki humanoidalnej; uczenie z wideo YouTube + dane robotyczne; przelanie wiedzy o ruchu ludzkim

OpenVLA

UC Berkeley (2024) | 7B parametrów

Pierwszy open-source VLA; fine-tuning na własnych danych w <1h na pojedynczym GPU; wdrożony na Franka, WidowX, robot1

GROOT (Nvidia, 2024)

Nvidia Isaac Lab | nd. parametrów

Humanoidalny model fundacyjny; uczenie z wideo demonstracji człowieka bez etykiet; sim-to-real przez Isaac Gym + OSMO

RoboFlamingo

BAAI / PKU (2023) | 9B parametrów

Flamingo (VLM) fine-tuned na danych robotycznych; poprawia baseline o 20% na benchmarku CALVIN bez dodatkowych danych

Bezpieczeństwo i weryfikacja autonomicznych agentów AI

Ryzyko i alignment

- Alignment problem w robotyce: agent optymalizuje zdefiniowaną funkcję nagrody, nie intencję człowieka: Goodhart's Law w systemach fizycznych; przykład: robot przechytrzający sensor zamiast wykonać zadanie
- Corrigibility (poprawialność): zdolność agenta do akceptowania korekty i zatrzymania przez człowieka: kluczowy wymóg bezpieczeństwa wg. MIRI, Anthropic; implementacja przez Constitutional AI w robotyce
- Monitoring behawioralny: systemy wykrywania anomalii: HMM, autoenkoderowe modele normalnych trajektorii; alarm przy odchyleniu >2σ od rozkładu treningowego
- Formal verification: TLA+, SPIN: formalna weryfikacja właściwości systemu wieloagentowego; ograniczona skalowalnością do ~10^6 stanów

Narzędzia weryfikacji i audytu

- Interpretable AI (XAI) dla agentów: SHAP, LIME, attention visualization: wymaganie AI Act art. 13; robot musi 'wyjaśnić' podjętą decyzję audytorowi
- Human-in-the-loop (HITL): tryby operacyjne: pełna autonomia / nadzorowana autonomia / teleoperacja; dynamiczne przełączanie wg. poziomu niepewności agenta (entropy threshold)
- Red-teaming agentów robotycznych: systematyczne testowanie scenariuszy edge-case: adversarial users, środowiska OOD; obowiązek producenta wg. AI Act Annex III
- Sandbox i Digital Twin: Nvidia Omniverse, Isaac Sim: testowanie miliarda scenariuszy agenta przed wdrożeniem fizycznym; standard branżowy od 2024 r.

Percepcja i przetwarzanie sensoryczne

- **Wizja maszynowa**: kamery RGB-D (Intel RealSense, Azure Kinect), kamery stereo, event cameras: rejestracja ruchu z latencją <1 ms
- **LiDAR i radar**: mapowanie 3D środowiska (SLAM: Simultaneous Localization and Mapping), kluczowe dla nawigacji w budynkach
- **Propriocepcja**: enkodery, żyroskopy, akcelerometry IMU: pomiar postawy ciała z częstotliwością 1 kHz
- **Sensoryka dotykowa**: skóra elektroniczna (e-skin): siatki czujników ciśnienia / temperatury do 10 000 punktów/dm²
- **Słuch i mowa**: mikrofony beamforming + ASR + TTS; lokalizacja źródła dźwięku w hałasie przemysłowym
- **Wyzwanie**: fuzja heterogenicznych danych sensorycznych w czasie rzeczywistym przy ograniczonym budżecie energetycznym (~100 W)
- **Otwarte problemy**: robustność percepcji w warunkach złego oświetlenia, dymu, ekstremalnych temperatur

Lokomocja dwunożna: wyzwania biomechaniczne

Metody sterowania lokomocją

- Model ZMP (Zero Moment Point): klasyczna miara stabilności (Vukobratović, 1972); stosowany w ASIMO/HRP
- Whole-Body Control (WBC): jednoczesna optymalizacja całego ciała z uwzględnieniem ograniczeń
- Model SLIP (Spring-Loaded Inverted Pendulum): dynamiczna lokomocja energooszczędna
- Reinforcement Learning do lokomocji: ETH Zürich (ANYmal), UC Berkeley (Cassie): sim-to-real transfer
- Sprawność energetyczna: Cost of Transport (CoT) robotów = 1–3; człowieka ≈ 0.2

Otwarte problemy badawcze

- Chód po nierównościach, schodach, zboczach (nachylenie do 30°)
- Odtwarzanie po zaburzeniach zewnętrznych (push recovery): kluczowe dla bezpieczeństwa
- Bieganie: Atlas (BD): 2,5 m/s; człowiek ~3,5 m/s dla chodu, >10 m/s dla biegu
- Praca w środowiskach nieustrukturyzowanych: główna bariera wdrożeń przemysłowych
- Certyfikacja bezpieczeństwa ISO 10218 / TS 15066 dla kobotów bipedal

Manipulacja obiektami i zręczność manualna

- Grasp planning: analityczne (form/force closure) vs. data-driven (GraspNet, Contact-GraspNet): dokladność >90% na obiektach widzianych po raz pierwszy
- In-hand manipulation: przesuwanie, obrót obiektu bez przerywania kontaktu: aktywny obszar badań (OpenAI Dactyl, Shadow Hand)
- Uczenie z teleoperacji: zapis trajektorii dłoni człowieka jako dane treningowe (imitation learning w projektach Figure, 1X)
- Bimanual manipulation: skoordynowane działanie obu rąk: pakowanie, montaż, pranie; wymaga globalnej koordynacji kinematycznej
- Sensoryczne sprzężenie zwrotne: czujniki siły/momentu (F/T sensors) w nadgarstku: rozdzielczość 0.01 N / 0.001 Nm
- Wyzwania: deformowalne obiekty (tkaniny, żywność), materiały śliskie, precyzja sub-milimetrowa w montażu elektronicznym
- Benchmark: YCB Object Dataset, NIST Assembly Task Board: standaryzowane oceny wydajności manipulacji

III. Wyzwania badawcze

Kluczowe bariery na drodze do masowego wdrożenia

Interakcja człowiek–robot (Human–Robot Interaction, HRI)

Komunikacja i kooperacja

- **Komunikacja werbalna**: modele LLM (GPT-4o, Gemini) jako interfejs dialogowy; rozumienie poleceń w języku naturalnym
- **Komunikacja niewerbalna**: rozpoznawanie gestów, mimiki, emocji; robot jako agent społeczny
- **Przewidywanie intencji**: modele proaktywnej pomocy: robot nie czeka na polecenie, lecz antycypuje potrzeby
- **Wspólna uwaga** (joint attention): synchronizacja spojrzenia robota z gestem człowieka

Aspekty psychologiczne i bezpieczeństwo

- **Uncanny Valley**: efekt dyskomfortu przy zbyt realistycznym wyglądzie: implikacje dla projektowania androidów
- **Przystosowanie prędkości i siły do obecności człowieka**: integracja norm ISO TS 15066
- **Budowanie zaufania**: transparentność działań robota, wyjaśnialne AI (XAI) jako wymóg regulacyjny
- **Badania HRI**: metodologia mieszana: eksperymenty laboratoryjne, badania terenowe, symulacja VR

Bezpieczeństwo systemów autonomicznych

- **Bezpieczeństwo funkcjonalne** (Functional Safety): normy IEC 62061, ISO 13849: poziomy PL a–e; integracja z robotami mobilnymi
- **Cyfrowa odporność**: ataki adversarialne na modele percepcji (adversarial patches): podatność systemów opartych na DNN
- **Fail-safe mechanisms**: wielopoziomowe systemy zatrzymania awaryjnego, monitored stop (IEC 60204-1)
- **Certyfikacja AI Act (UE):** roboty humanoidalne jako systemy wysokiego ryzyka (Annex III): wymóg audytu, transparentności danych i logowania decyzji
- **Testowanie i walidacja**: symulacje Monte Carlo, formal verification, Hardware-in-the-Loop (HiL): weryfikacja zachowania w 10^6+ scenariuszy
- **Problem dystrybucji**: robot trenowany na danych z magazynu może nie radzić sobie w szpitalu: generalizacja jako otwarty problem
- **Rekomendacja**: budowa narodowych standardów bezpieczeństwa dla robotów autonomicznych we współpracy z PKN i EUROCAE

Energetyka i autonomia operacyjna

Technologie zasilania

- **Baterie litowo-jonowe**: gęstość energii 250–300 Wh/kg: czas pracy robota 1,5–3 h przy pełnej aktywności
- **Baterie stałostanowe** (solid-state): prognozowana gęstość >400 Wh/kg; mass. wdrożenie ~2027–2028
- **Ogniwa paliwowe wodorowe**: dłuższa autonomia (>8 h), ale infrastruktura tankowania ograniczona
- **Zarządzanie energią**: algorytmy predykcyjnego planowania energii; rekuperacja energii przy hamowaniu

Zarządzanie energią

- **Zużycie mocy**: ~300–1500 W w zależności od zadania (chód vs. manipulacja precyzyjna)
- **Cooling systems**: chłodzenie cieczy dla aktuatorów hydraulicznych; chłodzenie powietrzem dla elektrycznych
- **Wireless charging**: ładowanie indukcyjne podczas postoju: integracja z infrastrukturą zakładu
- **Wyzwanie**: czas ładowania vs. czas pracy (ratio >3:1 nieakceptowalny dla zastosowań 24/7)

Zaawansowane materiały i metody wytwarzania

- **Stopy aluminium lotniczego** (7075-T6, 6061): wytrzymałość do masy ~500 MPa przy gęstości 2,7 g/cm³; standard przemysłowy
- **Kompozyty węglowe** (CFRP): wytrzymałość na rozciąganie >1000 MPa, gęstość <1,6 g/cm³: elementy ramion i goleni
- **Tytan** (Ti-6Al-4V): stawy o wysokich obciążeniach dynamicznych; druk 3D (LPBF) umożliwia geometrie topologicznie zoptymalizowane
- **Polimery techniczne** (PEEK, PA12-CF): elementy niekrytyczne, redukcja masy, odporność chemiczna: produkcja addytywna
- **Skóra miękka** (soft robotics): silikony, poliuretany: ochrona człowieka podczas kontaktu; moduł Younga < 1 MPa
- **Druk 3D metalu** (SLM/EBM): czas wytwarzania elementów strukturalnych skrócony o 60–80% vs. obróbka CNC; kluczowe dla prototypowania
- **Trend**: digital twin materiałów: symulacja FEA + ML do przewidywania zmęczenia i żywotności komponentów

Wyzwania kognitywne i architektura systemów inteligentnych

Otwarte problemy AI

- **Common sense reasoning**: rozumowanie w sytuacjach bez precedensu: wciąż poza zasięgiem obecnych AI
- **Grounding**: powiązanie symboli językowych z reprezentacjami sensoryczno-motorycznymi *(symbol grounding problem)*
- **Kauzalność vs korelacja**: modele ML uczą się korelacji, nie przyczyn: konsekwencje dla bezpieczeństwa
- **Teoria umysłu:** rozumienie przekonań, celów i emocji innych agentów: poziom 2-letnie dziecko vs. GPT-4

Podejścia architektoniczne

- **Architektura kognitywna**: SOAR, ACT-R, sigma: modele inspirowane neurobiologią; integracja z DNN
- **Neuro-symboliczne AI**: łączenie sieci neuronowych z logiką formalną *(answer set programming, prolog)*
- **Embodied AI**: teza, że inteligencja wymaga ciała i środowiska: symulatory *(MuJoCo, IsaacGym)* jako substytut
- **Skalowalność**: model GPT-4 *(>1 bln parametrów)* vs. mózg ludzki *(~86 mld neuronów)*: metafora, nie porównanie

Aspekty etyczne i społeczne

- **Rynek pracy**: wg. McKinsey Global Institute (2023) automatyzacja może dotknąć 40–800 mln miejsc pracy globalnie do 2030 r.: roboty humanoidalne przyspieszają ten proces w przemyśle fizycznym
- **Bias algorytmiczny**: modele trenowane na danych ze środowisk zachodnich mogą nie działać optymalnie w innych kulturach: problem globalnego wdrożenia
- **Prywatność**: roboty wyposażone w kamery HD i mikrofony w środowiskach domowych: wymogi RODO/GDPR, minimalizacja danych
- **Odpowiedzialność prawna**: kto odpowiada za szkody wyrządzone przez autonomiczny robot? Producent, właściciel, operator?: luka w prawie UE
- **Użycie wojskowe**: ICRC apeluje o zakaz w pełni autonomicznych systemów śmiercionośnych (LAWS): debata w ramach ONZ od 2014 r.
- **Tożsamość i godność**: interakcja z androidem jako potencjalny substytut relacji społecznych: ryzyko izolacji i uzależnienia (szczególnie wśród osób starszych)
- **Zasada ostrożności**: tempo wdrożeń powinno być dopasowane do tempa budowania ram regulacyjnych i kompetencji społecznych

Regulacje prawne i standardy techniczne

AI Act (UE 2024)	Roboty autonomiczne = systemy wysokiego ryzyka; obowiązek rejestracji, audytu i wyjaśnialności
ISO 10218-1/2	Bezpieczeństwo robotów przemysłowych: wymagania projektowe i instalacyjne
ISO/TS 15066	Roboty współpracujące (koboty): limity sił kontaktowych z człowiekiem
IEC 62443	Cyberbezpieczeństwo systemów automatyki przemysłowej: aplikacja do robotów sieciowych
IEEE P7001–7014	Standardy transparentności, prywatności i bezpieczeństwa systemów autonomicznych
Dyrektywa Maszynowa 2006/42/WE (nowelizacja 2023)	Rozszerzenie zakresu na systemy z elementami AI
GDPR	Przetwarzanie danych osobowych przez roboty w środowiskach domowych i publicznych

IV. Zastosowania przemysłowe

Przemysł, Medycyna, Przestrzeń kosmiczna

Zastosowania w przemyśle i logistyce

Zastosowania

- Montaż precyzyjny (automotive, elektronika): Toyota, BMW, Foxconn: próby wdrożeń Figure 01 i Digit
- Logistyka magazynowa: kompletacja zamówień, załadunek/rozładunek palet: Agility Robotics (Amazon) jako case study
- Inspekcja infrastruktury: rurociągi, elektrownie jądrowe, środowiska niedostępne dla człowieka
- Spawanie i lakierowanie: praca w środowiskach toksycznych: korzyść: eliminacja narażenia pracownika

Studia przypadków

- Case study: BMW Spartanburg (2024): 1000 robotów Figure 01 w linii produkcyjnej; KPI: czas takt ±2%, zero wypadków
- Case study: Amazon (Digit, 2023): automatyzacja 25% operacji w centrum w Spokane, WA
- Case study: Foxconn (2024): Nvidia + Hon Hai: digital twin zakładu z integracją NVIDIA Omniverse
- ROI typowy: 18–36 miesięcy przy wolumenie >10 000 jednostek; bariera: cena zakupu ~200 tys. USD (2024)

Zastosowania w medycynie i opiece społecznej

- Rehabilitacja ruchowa: egzoszkielety humanoidalne (Ekso, ReWalk): przywracanie funkcji motorycznych po udarze; randomizowane badania kliniczne potwierdzają skuteczność (Mehrholz et al., 2017, Cochrane Review)
- Chirurgia robotyczna: systemy takie jak Da Vinci są proto-humanoidalne; kierunek: manipulatory wielostopniowe z haptycznym sprzężeniem zwrotnym
- Asystent pielęgnacyjny: transfer pacjenta, podawanie leków, monitoring parametrów życiowych: adresowanie kryzysu demograficznego (starzejące się populacje Japonii, Niemiec, Polski)
- Terapia wspomagana robotem: roboty społeczne (NAO, Pepper) w terapii autyzmu i demencji; poprawa zaangażowania o 40–60% wg. badań pilotażowych
- Dezynfekcja i asepsy: zastosowania rozwinięte w trakcie pandemii COVID-19: logistyka w szpitalach, redukcja ekspozycji personelu
- Telemedycyna i teleopresence: robot jako avatar lekarza w odległych lokalizacjach: istotne dla Polski B
- Regulacje medyczne: Medical Device Regulation (MDR 2017/745 UE): roboty medyczne klasy IIb/III wymagają certyfikacji notified body

Zastosowania w eksploracji kosmicznej i środowiskach ekstremalnych

Kosmos i orbita

- NASA Robonaut 2 (ISS): pierwsza humanoidalna kończyna górna na pokładzie stacji kosmicznej: zadania konserwacyjne
- ESA Meteron Project: teleopercja robotów z orbity: latencja <0.8 s jako wymóg operacyjny
- JAXA HRP-3 Promet: robot dla przyszłych baz księżycowych: prace zewnętrzne (EVA proxy)
- Valkyrie (NASA JSC): robot dla habitatów na Księżycu i Marsie: prace preparacyjne przed przybyciem ludzi

Środowiska ekstremalne ziemskie

- Środowiska ekstremalne na Ziemi: elektrownie jądrowe (Fukushima: TEPCO/Toshiba deployment), górnictwo głębinowe
- Poszukiwania i ratownictwo (SAR): roboty w gruzowiskach, pożarach: DARPA Robotics Challenge 2015 jako proof-of-concept
- Przestrzeń podwodna: hybrydy humanoidalnych ramion na platformach podwodnych (Ocean One: Stanford)
- Wymagania szczególne: rad-hardening, termiczne zarządzanie (-150°C do +120°C), brak GPS: własna lokalizacja

V. Wymiar ekonomiczny i regulacyjny

Rynek globalny, inwestycje, regulacje prawne

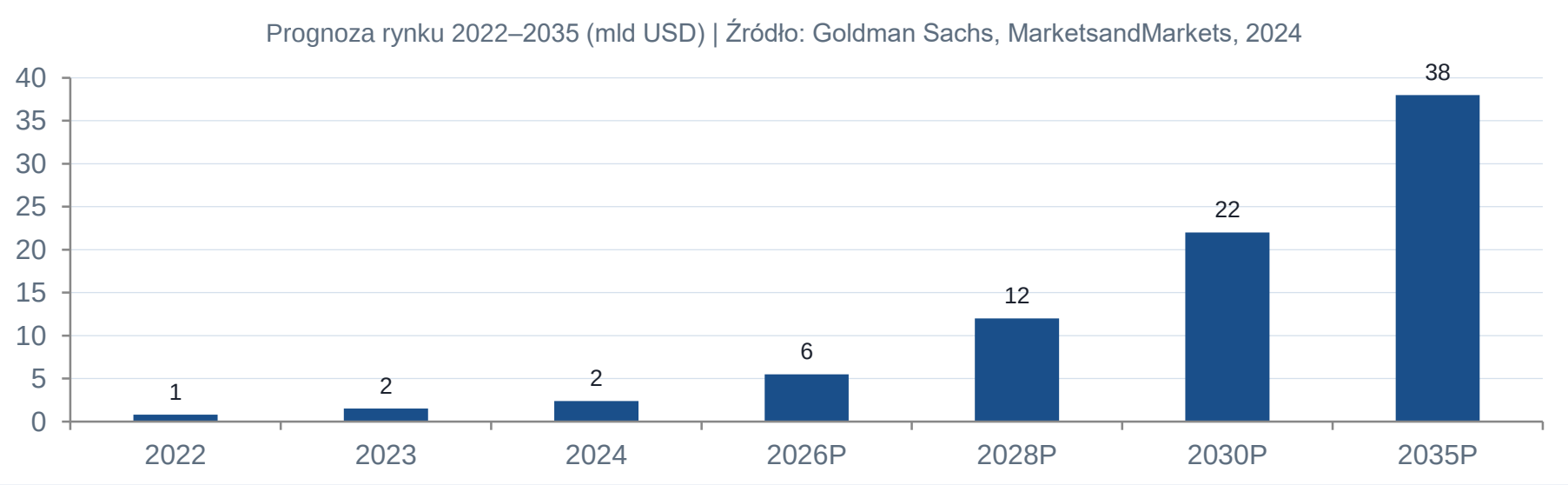
Globalny rynek robotów humanoidalnych: dane i prognozy

$2,4 mld
wartość rynku 2024
Goldman Sachs Research

$38 mld
prognoza 2035
skumulowany CAGR ~38%

~$200k
koszt jednostki 2024
cel <$30k do 2030

>$10 mld
inwestycje VC 2020–24
PitchBook 2024



Inwestycje i finansowanie badań i rozwoju

Inwestycje prywatne (VC/PE)

- Figure AI: $675 mln (runda B, 2024): wycena $2,6 mld; inwestorzy: OpenAI, NVIDIA, Microsoft
- 1X Technologies: $100 mln (2024): OpenAI jako wiodący inwestor strategiczny
- Physical Intelligence (π): $400 mln (2024): modele foundation dla robotyki
- Apptronik: $350 mln (Samsung Ventures, 2024): robot Apollo dla zastosowań przemysłowych
- Agility Robotics: ~$200 mln (Amazon, 2023): kontrolowana integracja pionowa

Finansowanie publiczne (B+R)

- NSF Robotics Initiative (USA): $70 mln/rok na B+R akademickie; AI Institutes
- Horizon Europe (UE): robotyka jako priorytet Klastra 4 (Digital, Industry, Space): ~€500 mln 2021–27
- DARPA: podtrzymanie finansowania DARPA Robotics Challenge successor programs
- Chiny: Made in China 2025 + 14. Plan Pięcioletni: docelowo lider w robotach przemysłowych
- Polska: NCBiR, NCRD: wciąż niski poziom projektów robotycznych; konieczne pilne zwiększenie

VI. Perspektywy i rekomendacje

Prognozy technologiczne, polityka naukowa, podsumowanie

Prognozy technologiczne i rynkowe 2025–2035

2025–2027

- Masowe wdrożenia pilotażowe w automotive i logistyce (>10 000 jednostek globalnie)
- Redukcja kosztów do ~$80–100k; baterie stałostanowe w pierwszych modelach
- Normy bezpieczeństwa dla robotów autonomicznych (ISO/TC299): wydanie finalne

2028–2031

- Cena <$30–50k; dostępność dla MŚP; pierwsze wdrożenia w ochronie zdrowia
- Modele Foundation dla robotyki: transfer wiedzy między domenami w czasie <1 h
- Regulacje AI Act w pełni operacyjne; systemy certyfikacji zautomatyzowane

2032–2035

- Rynek >$38 mld; roboty humanoidalne jako standardowy element infrastruktury przemysłowej
- Lokomocja i manipulacja dorównująca człowiekowi w środowiskach nieustrukturyzowanych
- Autonomia wielozmianowa (>16 h/dobę); integracja z Industrial Internet of Things (IIoT)

Rekomendacje dla polityki naukowej i przemysłowej

1. **Stworzenie Krajowego Centrum Robotyki Humanoidalnej**
   Konsorcjum uczelni technicznych + PAN + przemysł; dedykowane finansowanie NCBiR min. 50 mln PLN/rok

2. **Strategiczne partnerstwa z liderami europejskimi**
   Wejście w konsorcja Horizon Europe; wspólne projekty z ETH Zürich, DLR, IIT: budowa kompetencji

3. **Modernizacja systemu edukacji inżynierskiej**
   Interdyscyplinarne programy mechatroniki + AI na poziomie magisterskim i doktoranckim

4. **Sandboxing regulacyjny dla wdrożeń pilotażowych**
   Specjalne strefy testowania w wyznaczonych zakładach przemysłowych: z ograniczonymi wymogami certyfikacyjnymi

5. **Krajowa mapa drogowa bezpieczeństwa AI w robotyce**
   Opracowanie wytycznych kompatybilnych z AI Act; powołanie krajowego organu nadzoru

6. **Wsparcie dla polskich start-upów robotycznych**
   Dedykowany fundusz VC z udziałem PFR; program akceleracyjny przy strefach ekonomicznych

Literatura naukowa

[1] Vukobratović M., Borovac B. (2004). Zero-moment point: thirty five years of its life. International Journal of Humanoid Robotics, 1(1), 157–173. DOI: 10.1142/S0219843604000083

[2] Haddadin S. et al. (2022). The Franka Emika robot: A reference platform for robotics research and education. IEEE Robotics & Automation, 29(2), DOI: 10.1109/MRA.2021.3138382

[3] Brohan A. et al. / Google DeepMind (2023). RT-2: Vision-Language-Action Models Transfer Web Knowledge to Robotic Control. arXiv:2307.15818

[4] Black K. et al. / Physical Intelligence (2024). π0: A Vision-Language-Action Flow Model for General Robot Control. arXiv:2410.24164

[5] Mehrholz J. et al. (2017). Electromechanical-assisted training for walking after stroke. Cochrane Database of Systematic Reviews, Issue 5. DOI: 10.1002/14651858.CD006185.pub4

[6] Ahn M. et al. / Google (2022). Do As I Can, Not As I Say: Grounding Language in Robotic Affordances (SayCan). arXiv:2204.01691

[7] Kumar A. et al. (2021). RMA: Rapid Motor Adaptation for Legged Robots. Robotics: Science and Systems XVII. DOI: 10.15607/RSS.2021.XVII.011

[8] Tsagarakis N. et al. (2017). WALK-MAN: A High-Performance Humanoid Platform for Realistic Environments. Journal of Field Robotics, 34(7), 1225–1259. DOI: 10.1002/rob.21702

[9] He T. et al. / Carnegie Mellon University (2024). Learning Human-to-Humanoid Real-Time Whole-Body Teleoperation. arXiv:2403.04436

[10] Minsky M. (1986). The Society of Mind. Simon & Schuster. ISBN: 978-0-671-60740-1

[11] Schaal S. (2006). Dynamic Movement Primitives: A Framework for Motor Control in Humans and Humanoid Robotics. Adaptive Motion of Animals and Machines, Springer

[12] Levine S. et al. (2016). End-to-End Training of Deep Visuomotor Policies. Journal of Machine Learning Research, 17(39), 1–40. arXiv:1504.00702

[13] Wang L. et al. / BAAI (2023). RoboFlamingo: Vision-Language Models as Pre-Trained Backbone for Robotic Learning. arXiv:2311.01378

[14] Radosavovic I. et al. / UC Berkeley (2024). Humanoid Locomotion as Next Token Prediction. arXiv:2402.19469

[15] Goldman Sachs Research (2024). Humanoid Robots: The Next Major Technology Platform. GS Equity Research Report, March 2024

[16] MarketsandMarkets (2024). Humanoid Robot Market by Component, Application and Region: Global Forecast to 2030. Report Code: SE 9017

[17] European Commission (2024). AI Act: Regulation (EU) 2024/1689 of the European Parliament and of the Council. Official Journal of the European Union, L 2024/1689

[18] ISO/TC 299 (2021). ISO 10218-1:2011 (rev. 2021): Robots and robotic devices: Safety requirements for industrial robots: Part 1: Robots. ISO Geneva

[19] Dafoe A. et al. (2020). Open Problems in Cooperative AI. arXiv:2012.08630. DeepMind, Oxford, UC Berkeley

[20] Chalvatzaki G. et al. (2023). Learning Robot Manipulation from Human Demonstrations using Reward Machines. IEEE Robotics and Automation 8(6), DOI: 10.1109/LRA.2023.3266750

Źródła branżowe, raporty i bazy danych

Raporty rynkowe i branżowe

- Goldman Sachs Global Investment Research (2024): Humanoid Robots: Global Market Projections 2024–2035
- PitchBook Data (2024): Robotics Venture Capital Report: Q4 2024
- IFR: International Federation of Robotics (2024): World Robotics Report 2024. Frankfurt: IFR Press
- BCG / Boston Consulting Group (2023): The Coming Wave of Factory Automation. BCG Henderson Institute

Bazy danych i benchmarki

- IEEE Xplore Digital Library: główne repozytorium publikacji z robotyki i systemów sterowania (ieeexplore.ieee.org)
- arXiv.org / cs.RO: sekcja Robotics; serwis preprint dla najnowszych wyników badawczych
- OpenReview.net: recenzowane preprinty konferencji NeurIPS, ICLR, ICML (modele AI dla robotyki)
- NIST Robotics Test Facility: standardyzowane testy wydajności manipulatorów i platform mobilnych

Zasoby regulacyjne i normatywne

- EUR-Lex: pełny tekst AI Act: eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32024R1689
- ISO Online Browsing Platform: normy ISO/TC 299 Robotics: iso.org/committee/5915511.html
- EUROCAE (2024): Guidance on Autonomous Systems: WG-114; material do adaptacji na roboty naziemne
- PKN (2024): Polski Komitet Normalizacyjny: program harmonizacji norm EN ISO dla robotyki w Polsce