URZĄDZENIA BRZEGOWE (EDGE)

dla robotów humanoidalnych

Stan aktualny · Luki technologiczne · Perspektywy
Radar Aptiv SRR8+ · PULSE · Sensing THz

Prezentacja techniczna dla Rady Gospodarczej · 2026
dr inż. Tomasz Żabiński, dr inż. Mateusz Pomianek

Plan prezentacji

I **Kontekst i definicje**
Dlaczego edge ma znaczenie — latencja, autonomia, bezpieczeństwo — slajdy 3–5

II **Aktualny stan urządzeń brzegowych**
Sensory wizyjne, LiDAR, IMU, obliczenia na robocie — slajdy 6–12

III **Analiza luk technologicznych**
Co brakuje — wykrywanie ludzi, close-range, energie, latencje — slajdy 13–17

IV **Radar i detekcja człowieka**
Aptiv SRR8+, PULSE, architektura fuzji sensorycznej — slajdy 18–22

V **Sensing w zakresie THz**
Zasady fizyczne, aplikacje, TRL, integracja z robotem — slajdy 23–26

VI **Mapa drogowa i rekomendacje**
Prognozy TRL, kierunki R&D, rekomendacje dla rady — slajdy 27–30

Dlaczego przetwarzanie brzegowe (edge) jest kluczowe dla robotów humanoidalnych?

<5 ms
wymagana latencja reaktywna
ISO TS 15066 — kontakt z człowiekiem

~1 500 W
pobór mocy platformy
w tym obliczenia edge: 100–300 W

>100 ms
latencja chmury 4G/5G
niedopuszczalna dla sterowania ruchem

RODO
dane biometryczne on-device
zakaz przesyłania do chmury bez zgody

Argumenty za edge

- **Bezpieczeństwo fizyczne**: reakcja na nieoczekiwany kontakt musi nastąpić w <1–5 ms — niemożliwe przy round-trip do serwera (min. 50–100 ms dla 5G)
- **Niezawodność**: robot musi działać bez łączności sieciowej — awarie infrastruktury, tunele, zakłady przemysłowe bez Wi-Fi
- **Prywatność i compliance**: dane z kamer, mikrofonów i sensorów biometrycznych zbierane przez roboty podlegają RODO; przetwarzanie lokalne eliminuje ryzyko prawne
- **Efektywność energetyczna**: transmisja danych strumieniowych (kamera 4K = ~3 Gbps) wyczerpuje budżet sieciowy i bateryjny szybciej niż lokalne wnioskowanie

Implikacje systemowe

- **Architektura warstwowa**: reflexy (edge, <1 ms) → planowanie reaktywne (edge, <50 ms) → planowanie strategiczne (chmura, >500 ms) — właściwy podział obowiązków
- **Latencja a bezpieczeństwo**: przy prędkości ramienia 1 m/s i człowieku w odległości 0,3 m — system ma 300 ms na zatrzymanie; edge to jedyna opcja
- **Autonomia offline**: misje ratownicze, praca w strefach bez infrastruktury (Fukushima, Mars), środowiska wojskowe (EMC zakłócenia)
- **Koszt infrastruktury**: flota 1000 robotów streamująca dane surowe = ~300 Gbps stałego pasma — koszt cloud prohibitywny; edge radykalnie go redukuje

Taksonomia urządzeń brzegowych w robocie humanoidalnym

Warstwa percepcji

- Kamery RGB-D, stereo, event cameras
- LiDAR (solid-state, mechaniczny)
- Radar mmWave / FMCW
- IMU (żyroskop + akcelerometr)
- Sensoryka dotykowa / ciśnieniowa
- Mikrofony beamforming, sonar

Warstwa obliczeniowa

- NPU (Neural Proc. Unit) dedykowany AI
- GPU mobilne (Orin, AMD Xilinx)
- FPGA (Xilinx Kintex, Intel Arria)
- Mikrokontrolery RT (reflexy <1 ms)
- DSP (przetwarzanie sygnałów RAW)
- SoC zintegrowany (perception+control)

Warstwa komunikacji

- EtherCAT — sterowanie aktuatorami
- ROS 2 DDS — komunikacja modułów
- CAN bus — sensory niskopriorytetowe
- TSN Ethernet (IEEE 802.1Qbv) — RT
- WiFi 6E / UWB — lokalizacja precyzyjna
- Bluetooth LE — wearables pacjenta

Wymagania czasowe i budżet mocy — ramy projektowe

Zadanie / moduł	Latencja max.	Pobór mocy	Platforma HW
Reflex ochronny (kolizja)	**<1 ms**	~0.5 W	*MCU RT (Cortex-M33)*
Sterowanie balansem	**1–5 ms**	~5 W	*DSP + FPGA*
Wykrywanie przeszkód	**5–20 ms**	~15 W	*NPU (INT8)*
Fuzja sensoryczna	**20–50 ms**	~25 W	*GPU mobilny / Orin NX*
Detekcja człowieka (HRI)	**50–100 ms**	~40 W	*Jetson Orin + Radar NPU*
Planowanie zadania	**100–500 ms**	~80 W	*Jetson AGX Orin*
Wnioskowanie LLM (lokalne)	**>500 ms**	~150 W	*Orin + offload NPU*

Łączny budżet mocy edge (szacunek): 200–350 W · Rezerwa na zasilanie aktuatorów: 800–1200 W · Bateria 48V 100Ah ≈ 4,8 kWh → autonomia ~3–4 h

SEKCJA II

Aktualny stan urządzeń brzegowych

Sensory · Obliczenia · Komunikacja

Systemy wizyjne — kamery i widzenie maszynowe

Główne typy kamer

- **Intel RealSense D435i / D455**: kamera stereo RGB-D; zasięg 0.1–10 m; rozdzielczość głębi 848×480@90fps; zintegrowany IMU 6-DOF; USB3; <3.5 W; standard w robotach badawczych (TIAGo, Spot)
- **Microsoft Azure Kinect DK**: Time-of-Flight sensor; 1 MP głębia + 12 MP RGB; 512×512@30fps; SDK z body tracking 32 joint; <5.9 W; ograniczona autonomia od chmury
- **Kamery event (neuromorphic):** Prophesee Metavision EVK4 — 1280×720, dynamika 120 dB, latencja <1 ms; DAVIS346 — kombinowana kamera+event; idealna dla szybkich ruchów
- **Kamera stereo wide-FOV**: ZED 2i (Stereolabs) — 120° FOV, depth do 20 m, wbudowane IMU; OAK-D (Luxonis); zintegrowany NPU Intel Myriad X do detekcji na urządzeniu

Zagadnienia szczegółowe i wyzwania

- **Kamery termiczne**: FLIR Lepton 3.5; 160×120@8.7fps; Boson 640 — 640×512; detekcja obecności człowieka niezależna od oświetlenia; zasięg detekcji ciepłoty <15 m
- **Plenoptyczne (light field):** Raytrix R29; pomiar głębokości z jednej kamery; potencjał dla manipulacji w złym oświetleniu; wciąż TRL 4–5 dla robotyki
- **Wyzwania montażu**: robot humanoidalny = platforma ruchoma; wstrząsy, drgania mechaniczne degradują jakość obrazu; wymóg image stabilization lub aktywnego gimbala
- **Latencja pipeline**: kamera (exposure + readout) + GPU detekcja = 30–80 ms; dla reactive HRI za wolne bez optymalizacji; konieczna asynchroniczna architektura

LiDAR — mapowanie 3D i nawigacja

Mechaniczne skanujące

- **Velodyne VLP-16** (Puck): 16 kanałów, 360°, zasięg 100 m, 300k pkt/s; ciężki (830 g), zużycie 8 W
- **Ouster OS0-32**: 32 kanały, zasięg 50 m; montaż w głowie/torsie; bardziej kompaktowy (~450 g)
- **Zastosowanie**: globalne mapowanie SLAM; planowanie ścieżki w budynku
- **Ograniczenie**: ruchome części — podatność na wibracje robota; żywotność <50k h

Solid-State LiDAR

- **Hesai AT128**: 128 kanałów MEMS, FOV 120°×25°, zasięg 200 m, 1.5M pkt/s; <12 W; przeznaczony auto AV
- **Livox MID-360**: nieklasyczny wzorzec skanowania; 360° horizontal; czuły na bliski zasięg; <15 W
- **Luminar Halo**: 1550 nm laser (eye-safe); 250 m zasięg; fokus automotive; rosnące zastosowanie w humanoidach
- **Zaleta**: brak części ruchomych; odporność na wstrząsy; montaż stały w głowie lub torsie

Flash LiDAR i TOF

- **Texas Instr. OPT8241**: 320×240 TOF, zasięg 0.1–4 m; do manipulacji dłońmi i bliskiego otoczenia
- **Terabee TeraRanger Evo**: zasięg 60 m, lightweight 38 g, I²C; skalowalne do mini-array
- **Sony DepthSense IMX556**: stacked SPAD array; high-framerate 3D; rosnąca integracja z CMOS
- **Ograniczenie**: mały FOV i zasięg; uzupełnienie, nie substytut skanującego LiDAR

IMU, propriocepcja i sensoryka dotykowa

Inercja i stawy

- **IMU 6-DOF (Inertial Measurement Unit):** Bosch BMI088 — ±24g akcelerometr, ±2000°/s żyroskop, 2 kHz; STMicro ISM330DLC; zatwierdzony automotive; odczyt w 400 µs
- **IMU 9-DOF z magnetometrem**: VectorNav VN-100; AHRS; dokładność orientacji <0.5° RMS; temp. -40°C to +85°C; stosowany w Atlas (Boston Dynamics)
- **Enkodery absolutne**: Heidenhain ECI 119; 23-bit dokładność, SSI/BiSS-C; Renishaw RESOLUTE; 0.001° rozdzielczość; zintegrowane z każdym stawem
- **Czujniki momentu/siły** (F/T): ATI Mini45; 6-DOF, odczyt 7 kHz; Sunrise Instruments M3702C; kluczowe dla impedance control przy HRI; rozdzielczość 0.01N

Sensoryka skórna i siłowa

- **Skóra elektroniczna** (e-skin): SynTouch BioTac; 19 elektrod taktylnych + temperatura + wilgotność; Pressure Profile PPS; siatki do 352 pkt/cm²; TRL 5/6
- **Czujniki w podeszwie** (foot sensor): planarne siatki sił; 256 pkt nacisku w podeszwie; kluczowe dla ZMP i balance control; integracja z IMU
- **Czujniki temperatury i zbliżenia** (skin proximity): pojemnościowe matryce; wykrywanie przybliżenia dłoni człowieka PRZED kontaktem; Pre-touch sensing
- **Wyzwanie integracji**: 60+ sensorów na typowej platformie → bus sensoryczny: EtherCAT 1 kHz wymagane; problem synchronizacji czasowej sub-ms (IEEE 1588 PTP)

Platformy obliczeniowe edge — aktualny stan

Platforma	AI Perf.	Pobór mocy	Charakterystyka i zastosowanie
NVIDIA Jetson AGX Orin 64GB	**275 TOPS**	15–60 W	Wiodąca platforma AI edge; 12-core Cortex-A78 + 2048-cuda Ampere GPU + DLA; stosowana w Figure 01, Agility Digit
NVIDIA Jetson Orin NX 16GB	**100 TOPS**	10–25 W	Kompromis cena/moc; idealny dla modułów peryferyjnych (głowa, dłoń); model cascade z AGX
AMD Xilinx Kria KV260	**~1.4 TOPS**	~5 W	FPGA SoC — reactive control, signal proc; niskie latencje deterministyczne <1 µs; stosowany w reflexach
Qualcomm RB5 (QRB5165)	**~15 TOPS**	<10 W	Snapdragon 865 + Hexagon DSP NPU; 5G modem zintegrowany; mobilność, gorąca wymiana modułów
Intel Myriad X (MA2085)	**~4 TOPS**	~1–2 W	Neuronowy accelerator dla sensorów (OAK-D camera); Ultra-low power inference; 16 SHAVE cores
Texas Instr. TDA4VM	**~8 TOPS**	~5 W	Automotive-grade SoC; C7x DSP + MMA; real-time control + perception; safety ISO 26262 ASIL-B

Fuzja sensoryczna — obecne architektury

Strategie fuzji

- **Early fusion**: surowe dane ze wszystkich sensorów łączone przed przetwarzaniem — pełna informacja, ale wymóg synchronizacji sub-ms; stosowana w SLAM i odometrii wizualno-inercyjnej (VIO)
- **Late fusion**: każdy sensor przetwarza niezależnie, wyniki łączone przez detektor obiektów lub Kalman Filter; tolerancja na utratę jednego sensora; stosowana w detekcji przeszkód
- **Deep fusion** (attention-based): architektura Transformer łącząca reprezentacje latentne z wielu modalności; CLIP-analogia dla sensorów robotycznych; badania na poziomie TRL 3–4
- **Temporal fusion**: LSTM/GRU do łączenia danych z różnych chwil czasu — kluczowe dla predykcji trajektorii człowieka; latencja +5–20 ms

Implementacja i wyzwania

- **Standardy synchronizacji**: IEEE 1588 PTP (Precision Time Protocol) — synchronizacja <1 µs między węzłami; hardware timestamp na wszystkich sensorach — wymóg podstawowy
- **ROS 2 message_filters**: ApproximateTime policy dla dopasowania timestampów z tolerancją ±5 ms; nadal standard w platformach badawczych
- **Kalibracja ciągła**: online extrinsic calibration — kamera-LiDAR-IMU; dryft kalibracji w cyklu termicznym robota 0.1–0.5 mm/h — wymóg rekalibracji co 4–8 h
- **Ograniczenie**: brak standardowego frameworku fuzji dla robotów humanoidalnych — każdy producent implementuje własny stos; bariery interoperacyjności

Pokrycie sensoryczne — aktualny stan platform humanoidalnych

	Atlas (BD)	Digit (Agility)	Optimus (Tesla)	Figure 01	Unitree H1	iCub (IIT)
RGB-D Kamera	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Event Camera	✗	✗	✗	✗	✗	✓
Solid-State LiDAR	✓	✓	✓	✓	✗	✗
Mech. LiDAR	✗	✗	✗	✗	✓	✗
IMU 9-DOF	✓	✓	✓	✓	✓	✓
F/T Sensors	✓	✗	✗	✓	✗	✓
E-Skin	✗	✗	✗	✗	✗	✓
Radar mmWave	✗	✗	✗	✗	✗	✗
THz Sensor	✗	✗	✗	✗	✗	✗
Edge NPU	✓	✓	✓	✓	✓	✗
FPGA RT	✗	✓	✗	✗	✗	✓

Obecny Brak

Kluczowa obserwacja: ŻADNA platforma nie posiada radaru ani sensorów THz. E-skin i event cameras to wciąż rzadkość.

SEKCJA III

Analiza luk technologicznych

Co brakuje, czyli bariery wdrożenia masowego

Krytyczne luki sensoryczne — systematyczna analiza

Wykrywanie człowieka w złych warunkach

Kamery zawodzą przy słabym oświetleniu, zadymieniu, silnym słońcu (HDR ograniczony). LiDAR nie odróżnia człowieka od manekina. Brak aktywnego sensora przez-materiałowego. Skutek: robot zatrzymuje się lub kolizja.

Close-range sensing (<0.5 m)

Strefa martwa kamer RGB-D (min. 10–20 cm); LiDAR nie działa blisko; radar mmWave tradycyjny ma zasięg min. 0.3–0.5 m. Przy manipulacji i HRI robot jest 'ślepy' na bezpośrednie otoczenie dłoni.

Detekcja prędkości i trajektorii człowieka

Kamery mierzą pozycję klatkowo (frame-by-frame); brak bezpośredniego pomiaru prędkości radialnej. Radar Doppler daje v natychmiast. Przewidywanie kolizji z 0.5 s wyprzedzeniem — dziś niemożliwe w real-time.

Sensing przez przeszkody i w warunkach NLoS

Wszystkie sensory optyczne działają wyłącznie w Line-of-Sight. Radar i THz penetrują materiały. W zastosowaniach ratowniczych i medycznych (np. monitoring przez ścianę) — obecne sensory są bezużyteczne.

Budżet mocy vs. wydajność (power-accuracy tradeoff)

Jetson AGX Orin przy 60 W daje 275 TOPS — wystarczające. Ale całkowity edge stack (LiDAR 8W + kamera 5W + compute 60W + comm 10W) = ~83W tylko dla percepcji. Przy 1500 W całkowitych → 6% na sensing to mało.

Luki obliczeniowe i problemy latencyjne

Luki sprzętowe i obliczeniowe

- **Brak dedykowanego Radaru NPU**: obecne NPU (Jetson, Myriad X) zoptymalizowane pod kamery (CNN 2D) — przetwarzanie FMCW radar point cloud wymaga CFAR, beamforming, Doppler FFT; nieefektywne na GPU; opóźnienie 2–5× vs. ASIC
- **Problem heterogenicznych sensorów**: fuzja kamera+LiDAR+radar wymaga transformacji danych (tensor 2D → point cloud 3D → doppler spectrum); brak zunifikowanego frameworku; TRL 3
- **Deterministyczność vs. AI:** sieci neuronowe mają zmienny czas wnioskowania (jitter do ±30%); dla safety-critical reactive control nieakceptowalne; wymóg WCET (Worst-Case Execution Time) = blokada deep learning w reflexach
- **Memory bandwidth bottleneck**: LiDAR 1.5M pkt/s + kamera 4K@60fps + radar = ~12 GB/s strumień danych; Jetson Orin ma 204 GB/s LPDDR5 — na granicy; data starvation w full-stack

Luki ekosystemowe i software

- **Brak standardu dla Sensor Abstraction Layer**: każdy producent platformy (Boston Dynamics, Agility) implementuje własny HAL; brak open API; niemożliwa wymiana sensorów plug-and-play
- **Synchronizacja hardware trigger**: radar + kamera muszą być hardware-synchronized (sprzężony trigger) dla cross-modal kalibacji; brak standardowych złączy i protokołów — każda instalacja custom
- **Thermal throttling**: NPU i GPU przy długotrwałej pracy intensywnej skalują zegarki o 30–50% — degradacja latencji w trakcie misji; projektowanie chłodzenia pod scenariusz worst-case kluczowe
- **Software maturity**: biblioteki do przetwarzania radaru mmWave w kontekście robotycznym (nie automotive) są wciąż we wczesnej fazie; Texas Instruments mmWave SDK zoptymalizowany pod ADAS, nie HRI

Analiza porównawcza sensorów — Human Detection

	RGB-D Kamera	LiDAR SS	Radar mmWave	Radar THz	Event Camera
Zasięg detekcji	0.1–10m	1–200m	0.1–100m	0.01–10m	0.1–5m
Warunki słabego oświetlenia	✗	✗	✓	✓	✓
Dym / Mgła / Kurz	✗	✗	✓	✓	✗
Przenikanie przez materiały	✗	✗	~	✓	✗
Pomiar prędkości (Doppler)	✗	✗	✓	✓	✗
Bliski zasięg (<0.5 m)	~	✗	~	✓	✓
Rozdzielczość kątowa	<0.01°	0.1°	1–5°	0.5–2°	N/A
Zużycie energii	<5W	8–15W	<5W	<2W	<3W
Koszt	$$	$$$	$$	$$$$	$$$
Dojrzałość (TRL)	TRL9	TRL8	TRL6*	TRL4	TRL5

** Radar mmWave TRL 6 dla robotyki humanoidalnej (TRL 9 w automotive). Radar THz: TRL 4 dla robotyki, TRL 6 dla security screening.*

Luki normalizacyjne i certyfikacyjne

- **Brak normy dla sensoryki robotów humanoidalnych**: ISO/TC 299 (Robotics) nie definiuje minimalnego zestawu sensorów percepcji dla robotów pracujących z ludźmi — to jest luka prawna i bezpieczeństwa
- **Radar mmWave w robotyce**: normy radiowe (ETSI EN 302 288 — 77 GHz automotive) nie obejmują zastosowań robotycznych; wymóg uzyskania indywidualnego zezwolenia UKE; bariera dla wdrożeń komercyjnych w Polsce
- **THz emission standards**: brak europejskich norm dla urządzeń emitujących promieniowanie THz (0.1–10 THz) w środowiskach z ludźmi; FCC (USA) ma wytyczne dla 95–300 GHz (exp. licences); ETSI ERM TG34 wciąż w fazie roboczej
- **Certyfikacja sensorów jako Safety Component**: wg. AI Act i Dyrektywy Maszynowej 2023 — systemy percepcji robotów HRI kategoria wysokiego ryzyka; brak procedur certyfikacji specyficznie dla sensor fusion AI stack
- **Brak profilu interoperacyjności**: OPC UA for Robotics (DI + Robotics) nie obejmuje standardów danych sensorycznych; każdy vendor ma własny format — fuzja między-markowa wymaga custom middleware
- **Dane treningowe dla radaru**: modele ML detekcji człowieka radarowego trenowane na zbiorach automotive (CARRADA, RADDet) — niezgodne z geometrią HRI; brak publicznych datasetów radarowego dla humanoidów
- **Rekomendacja pilna**: powołanie grupy roboczej przy PKN/CEN/CENELEC dla standardów sensoryki edge w robotyce humanoidalnej — Poland może być inicjatorem w ramach polskiej prezydencji UE 2025

SEKCJA IV

Radar i detekcja człowieka

Technologia mmWave · Aptiv SRR8+ · PULSE Radar

Zasady fizyczne radaru FMCW mmWave

Podstawy sygnału FMCW

- **FMCW (Frequency Modulated Continuous Wave):** sygnał chirp liniowo modulowany w zakresie 77–81 GHz (auto) lub 60–64 GHz; beat frequency proporcjonalna do odległości celu; R = c·fbeat / (2·S), gdzie S = slope chirp
- **Pomiar prędkości (Doppler):** faza kolejnych chirpów zmienia się proporcjonalnie do prędkości radialnej; v = λ·fd/2; radar daje prędkość BEZ klatki referencyjnej — unikalna zaleta vs. kamera
- **Kąt detekcji (AoA):** anteny MIMO (np. 3Tx × 4Rx = 12 wirtualnych anten) tworzą wirtualną aperturę; beamforming cyfrowy → kąt horyzontalny/wertykalny z rozdzielczością ~1–5°
- **Point Cloud radarowy**: wynik to sparse 4D point cloud (x,y,z,v); gęstość ~50–500 pkt/frame (100 ms) vs. LiDAR 300k–1.5M pkt/frame; wyzwanie: detekcja ciała człowieka z kilkudziesięciu punktów

Zastosowania dla HRI

- **Micro-Doppler Signature**: kończyny człowieka generują unikalne mikro-Doppler amplitudy (machanie rąk ±0.3 m/s, kroki ±1.5 m/s); sieci CNN na spektrogramie Doppler klasyfikują gest/czynność bez kamery
- **Przenikanie materiałów**: sygnał 77 GHz przenika przez tkaniny (ubrania), cienką sklejkę, karton; tłumienie wody (ciało ludzkie ~80% wody) = silny odbłysk; beton tłumi >40 dB (nieprzezroczysty)
- **Zasięg vs. rozdzielczość**: bandwidth B = 4 GHz → rozdzielczość odległości c/(2B) = 3.75 cm; zasięg max ~ c·T/(2·S) dla danego slope; trade-off projektowy
- **Kluczowy parametr dla HRI**: CFAR (Constant False Alarm Rate) threshold — balans czułość vs. fałszywe alarmy w środowisku z wieloma obiektami; wymaga tuningu dla robota w magazynie vs. domu

Aptiv SRR8+ — specyfikacja i potencjał dla robotyki humanoidalnej

76–77 GHz
Zakres częstotliwości
ISM band, bez licencji

±75°
FOV horyzontalny
±20° wertykalny

0.15 m
Rozdzielczość odległości
BW=1 GHz

0.5–60 m
Zakres detekcji
optymalne 0.5–20 m

Charakterystyka techniczna

- **Architektura**: 4 TX / 4 RX MIMO FMCW; SoC Texas Instr. AWR2944 zintegrowany; oryginalne przeznaczenie: automotive AV (SRR 4. generacji), adaptacja dla robotyki
- **Interfejsy**: CAN-FD + Ethernet SOME/IP; wyjście: surowe ADC / point cloud / lista obiektów; most ROS 2 open-source (github.com/aptiv-radar)
- **Micro-Doppler**: rozróżnia chodzącego / stojącego / biegnącego człowieka po 2–5 klatkach; fałszywy alarm <3% w pomieszczeniach
- **Budżet**: 5–8 W; masa 205 g; IP67; -40°C do +85°C; integracja w klatce piersiowej lub barku robota

Zastosowania w HRI i robotyce

- **Fall detection**: prędkość pionowa >1.5 m/s + nagłe zatrzymanie → alert upadku z 2–8 m; bez kamery — pełna prywatność użytkownika
- **Vital signs**: oddech 0.1–0.5 Hz i tętno 0.8–2 Hz na nieruchomym celu do 3 m — zastosowania opieki domowej i monitoringu medycznego
- **Integracja HW**: GPIO hardware trigger + synchronizacja PPS dla multi-radar array; latencja wyzwolenia <1 ms; montaż barkowy pokrywa strefę HRI ±75°
- **Ograniczenia**: rozdzielczość kątowa 0.5–1.5° — niewystarczająca do lokalizacji kończyn <30 cm; wymaga fuzji z kamerą lub LiDAR; ~$200–350/szt.

Technologia PULSE — Pulsed Ultra-wideband Long-range Sensing Engine

PULSE (UWB Pulsed Radar): technologia impulsowego radaru ultraszerokopasmowego (UWB) generującego bardzo krótkie impulsy (<1 ns) o szerokości pasma >500 MHz (typowo 3.1–10.6 GHz). Zapewnia wyjątkową rozdzielczość odległości (<15 cm przy BW=1GHz), niski poziom zakłóceń elektromagnetycznych oraz zdolność penetracji materiałów. Stosowany w lokalizacji UWB (IEEE 802.15.4a/z) oraz SAR (Synthetic Aperture Radar) on-chip.

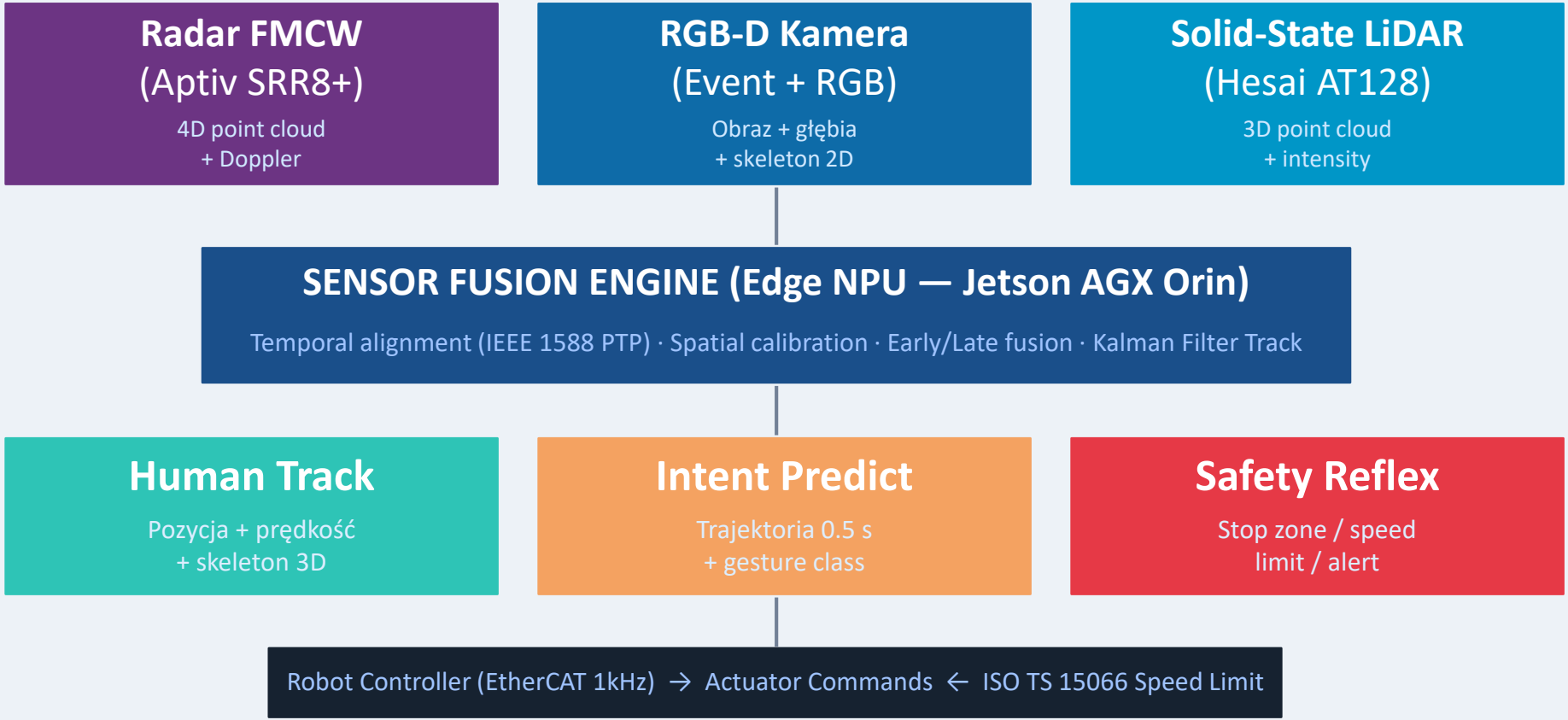
Zasada i parametry techniczne

- **Zasada działania**: generator impulsów GaN/SiGe produkuje pojedynczy impuls ps-ns; korelator dopasowany wyznacza TOA (Time of Arrival) z dokładnością <1 cm; brak potrzeby sygnału referencyjnego (oscylatora)
- **Kluczowe parametry dla robotyki**: zasięg 0.05–20 m; rozdzielczość 2–15 cm; odporność na NLOS (Non-Line-of-Sight); penetracja przez drywall 15 dB, odzież <3 dB — widzi ciało przez ubranie
- **Implementacje chipowe**: Novelda X4 (Xethru) — 7.25 GHz center, 1.5 GHz BW, SPI; Acconeer XM125 — 60.5 GHz pulsed radar; Qorvo DW3120 — UWB + ranging; Infineon BGT60TR24B — 60 GHz FMCW hybrid
- **Zastosowanie Xethru X4M200**: moduł rejestrowania oddechu i obecności człowieka; zasięg 0.3–5 m; detekcja bezdechu; wymiary 17×17 mm; <200 mW; stosowany już w robotach społecznych Pepper (mod.)

Zastosowania i wyzwania

- **Synthetic Aperture Radar (SAR) on-chip**: ruch robota tworzy aperturę syntetyczną — poprawa rozdzielczości kątowej do <1° przy aperturze 0.5 m; wymaga precyzyjnej odometrii; TRL 3–4 dla robotyki
- **Detekcja przez ściany**: impulsy UWB 3–10 GHz penetrują beton (<20 cm), cegłę, drewno; zastosowania ratownicze (wykrywanie ludzi przez gruzy); roboty Atlas-class jako platforma SAR
- **Vital signs przez ubranie**: PULSE wykrywa ruch klatki piersiowej (oddech 0.15–0.5 Hz), tętno (1–2 Hz) z odległości 0.5–3 m przez standardowe ubranie — bez kontaktu; zastosowanie w opiece domowej
- **Wyzwanie**: RFI (Radio Frequency Interference) — UWB impulsowy musi respektować maski emisji ETSI EN 302 065; moc max -41.3 dBm/MHz; ograniczenie w środowiskach z gęstą elektroniką

Proponowana architektura fuzji — Radar + Kamera + LiDAR dla HRI



SEKCJA V

Sensing w zakresie terahercowym (THz)

0.1–10 THz · Zasady fizyczne · Zastosowania · TRL

Spektroskopia i radar THz, zasady fizyczne i technologie emiterów

0.1–10 THz
zakres częstotliwości
1 THz = λ = 300 µm

<1 mm
rozdzielczość przestrz.
przy λ/2 dla 600 GHz

20 dB
przenikanie przez odzież
tłumienie @ 300 GHz

TRL 4–6
dojrzałość technologiczna
robotyka HRI: TRL 3–4

Technologie emiterów i detektorów

- **Zakres THz (0.1–10 THz):** pomiędzy mikrofalami a podczerwienią; fale elektromagnetyczne przenikają materiały nieprzewodzące (tekstylia, plastik, ceramika) — niewidoczne dla fal mm i IR
- **Emiter QCL (Quantum Cascade Laser)**: 1–10 THz; temperatury kriogeniczne (77 K); moc >100 mW; rozdzielczość spektralna <1 GHz; zastosowanie: spectroscopy, security screening; TRL 7
- **Emiter Gunn/IMPATT diody**: 100–300 GHz (sub-THz); temperatura pokojowa; moc 1–50 mW; koherentny; firmy: Virginia Diodes (VDI), Radiometer Physics; miniaturyzacja możliwa; TRL 7–8
- **CMOS/SiGe zintegrowane transceivery**: 200–300 GHz; moc <1 mW; chip 5×5 mm; producenci: Infineon (BGT60), IHP, MIT LL; pełna integracja z DSP; TRL 5–6 dla robotyki

Metody pomiaru

- **Time-Domain Spectroscopy (THz-TDS):** impuls fs-laserowy wzbudza emiter fotoprzewodzący → sweep 0.1–4 THz w <1 ns; identyfikacja chemiczna materiałów po spektrum absorpcji; stacjonarny, duży system
- **CW THz radar (Continuous Wave):** fotomikser lub fotodioda UTC; zasięg 1–10 m; możliwy doppler pomiar prędkości; rozdzielczość kątowa >1° bez beamformingu; latencja pomiaru 1–10 ms
- **THz imager (focal plane array):** bolometryczne detektory NbN; rozdzielczość 32×32 do 256×256 pikseli; framerate 25–50 fps; pasywny (ciało ludzkie emituje THz termicznie) lub aktywny z emiterem; TRL 6 (security)
- **Kluczowa właściwość dla robota**: THz widzi kontury ciała przez odzież; umożliwia detekcję kończyn, ocenę postawy i gesty MIMO i NLOS; nie narusza prywatności (brak rozpoznania twarzy)

Zastosowania sensoryki THz w robotach humanoidalnych

Detekcja i tracking człowieka

- **Kontur ciała przez ubranie:** pose estimation bez kamery; prywatność zachowana (brak ID twarzy)
- **Gesty dłoni wykryte przez odzież:** gesture UI bez touchscreena; dystans 0.3–2 m
- **Oddech + tętno przez bariery:** monitoring pacjenta przez poduszki/koc bez kontaktu
- **Fall detection** z dokładnością >95% (Lit.: Ahmad et al., 2021, IEEE T-MTT) w trybie pasywnym
- **Wykrywanie przez drzwi/ścianę:** alert bezpieczeństwa dla robotów autonomicznych nocnych

Diagnostyka i opieka medyczna

- **Wound imaging**: THz wrażliwy na zawartość wody — obrazowanie ran skóry bez kontaktu (Hernandez-Cardoso et al., 2017, Science Advances)
- **Skin burn depth assessment**: ocena głębokości oparzenia — wsparcie dla robota-asystenta medycznego
- **Drug/tablet inspection**: identyfikacja narkotyków ukrytych w opakowaniu (THz spectroscopy)
- **Inhalation monitoring**: robot opiekuńczy monitoruje oddech osoby starszej w zasięgu 1 m
- **Vein mapping**: sub-mm rozdzielczość THz — potencjał dla robotycznej asysty iniekcji IV

Inspekcja i środowiska ekstremalne

- **Inspekcja kompozytów CFRP**: THz wykrywa delaminacje, pęknięcia wewnętrzne <50 µm — robot inspekcyjny w przemyśle lotniczym
- **Kontrola opakowań żywności**: wilgotność i jednorodność — robot w linii spożywczej (TRL 8)
- **Wykrywanie niebezpiecznych substancji**: spektroskopia THz identyfikuje materiały wybuchowe RDX, PETN w zasięgu 1 m; robot EOD
- **Środowiska dymne** (pożar/katastrofa): THz penetruje dym wodny; robot SAR wykrywa ocalałych
- **Niska temperatura**: układy SiGe THz działają w -55°C (space qualified) — robot kosmiczny

Dojrzałość technologiczna THz i wyzwania integracji

Bariery techniczne

- **Tłumienie atmosferyczne**: para wodna silnie absorbuje THz — okna transmisyjne: 0.35, 0.41, 0.67, 0.85, 1.4 THz; w wilgotnych środowiskach zasięg spada do <1 m powyżej 1 THz; optymum: 300 GHz sub-THz
- **Rozmiar i masa**: kriogeniczne QCL wymaga Dewar z ciekłym azotem (77 K) — niemożliwe na robocie; systemy półprzewodnikowe (SiGe 300 GHz) mieszczą się w module 3×3 cm; gotowe do integracji
- **Moc obliczeniowa**: THz-TDS generuje broadband spectrum → FFT + kalibacja → duże wolumeny danych; CW radar jest prostszy; obróbka spectral image 64×64 = ~4 kFLOP/frame; możliwa na NPU
- **Cena**: QCL system: >$50k; fotomikser: ~$10–30k; SiGe transceiver chip: <$50 w wolumenie; trend: SiGe/CMOS THz dojdzie do <$20/chip do 2028 (Yole Développement 2024)

Bezpieczeństwo i regulacje

- **Bezpieczeństwo biologiczne**: ICNIRP (2020) wytyczne dla nietermicznego promieniowania THz — gęstość mocy <1 mW/cm² dla narażenia długotrwałego; pasywne systemy THz (detektory termiczne) — całkowicie bezpieczne
- **Normalizacja emisji**: FCC Part 15 (USA) zezwala na urządzenia do 300 GHz bez licencji przy <0 dBm EIRP; ETSI EN 303 686 (sub-THz 116–246 GHz) — nowa norma 2023; robotyka wchodzi w zakres
- **Rozdzielczość kątowa**: antena array 32×32 elementów @ 300 GHz przy aperturze 3 cm → HPBW ~3°; dla precyzyjnego trackingu kończyn (<10 cm @ 1 m) wymagana apertura >10 cm lub algorytmy MUSIC/ESPRIT
- **Roadmap miniaturyzacji**: IMEC (Belgia) demonstrował w 2023 r. SiGe chip 240–300 GHz z 4×4 array antenowym w obudowie QFN; integration z Jetson Orin przez PCIe — prototyp 2025

SEKCJA VI

Mapa drogowa i rekomendacje

TRL · Prognozy · Kierunki R&D · Rekomendacje dla Rady

Mapa drogowa dojrzałości technologicznej (TRL) — sensory edge

Technologia	TRL 2024	TRL 2026P	TRL 2030P	Uwagi
RGB-D Kamera	TRL9	TRL9	TRL9	*Dojrzała — dalszy rozwój: event hybrydowa*
Solid-State LiDAR	TRL8	TRL9	TRL9	*Automotive TRL9; humanoid: kalibracja/integracja*
IMU + Enkodery	TRL9	TRL9	TRL9	*Dojrzałe — MEMS dalej miniaturyzowane*
F/T Sensors	TRL8	TRL8	TRL9	*Miniaturyzacja dla palców; cena barierą*
Event Camera	TRL5	TRL6	TRL8	*Brak standardowych driverów i bibliotek*
E-Skin (taktylna)	TRL5	TRL6	TRL7	*IIT, MIT: demonstratory; skalowanie trudne*
Radar mmWave (SRR)	TRL6	TRL7	TRL9	*Automotive dojrzały; robotyka: SW/integracja*
PULSE UWB Radar	TRL5	TRL6	TRL7	*Xethru/Acconeer chipset gotowy; stack robotyczny TRL3*
THz CW (sub-THz 300G)	TRL4	TRL5	TRL7	*SiGe chip dojrzewa; software i integracja problem*
THz QCL/Spectroscopy	TRL3	TRL4	TRL5	*Wymaga miniaturyzacji kriogenicznej lub RT-QCL*
On-device Radar NPU	TRL4	TRL6	TRL8	*TI AWR + DNN accelerator; brak HRI datasetu*

Kierunki badań i rekomendacje R&D

1. **Radar mmWave dla HRI — priorytet krótkoterminowy (2025–2026)**
   Integracja Aptiv SRR8+ lub Texas Instr. IWR6843AOP z platformą Jetson Orin; opracowanie datasetu radarowego human-in-the-loop; benchmark detekcji vs. kamera w warunkach zadymienia/ciemności

2. **PULSE UWB dla close-range sensing (<0.5 m) (2025–2027)**
   Wdrożenie Acconeer XM125 (60.5 GHz) lub Xethru X4 w dłoniach i stopach robota; eliminacja strefy martwej; vital signs detection w zastosowaniach opiekuńczych; open-source ROS 2 driver

3. **Sub-THz (240–300 GHz) SiGe — program B+R (2026–2028)**
   Partnerstwo z IMEC, IHP lub Fraunhofer HHI; chip SiGe 300 GHz z 8×8 antenna array; integracja z body pose estimation; walidacja kliniczna dla monitorowania oddechu przez ubranie

4. **Zunifikowany Sensor Abstraction Layer (2025–2026)**
   Open-source middleware (ROS 2 pakiet) łączący kamery, LiDAR, radar, UWB z jednym API; standard timestampingu IEEE 1588 PTP; format wymiany danych kompatybilny z OPC UA Robotics Companion Spec

5. **Publiczny dataset HRI dla radaru i THz (2026–2027)**
   Zbieranie danych w środowiskach: magazyn, szpital, dom; modalności: kamera + LiDAR + mmWave radar + sub-THz; etykiety: skeleton, gesty, vital signs; licencja CC-BY 4.0; hosting na Hugging Face

6. **Normalizacja i regulacje — inicjatywa polska (2025)**
   Wniosek do PKN o powołanie KT ds. sensoryki robotycznej; propozycja pre-standardu do ISO/TC 299 WG8; współpraca z ETSI ERM dla norm emisji sub-THz i UWB w środowiskach przemysłowych

Podsumowanie i Literatura

Kluczowe wnioski

- Żadna platforma humanoidalna nie posiada jeszcze radaru ani THz
- Radar mmWave (Aptiv SRR8+) jest gotowy do integracji — TRL 6→7
- PULSE UWB rozwiązuje problem close-range <0.5 m
- Sub-THz 300 GHz: miniaturyzacja SiGe osiągalna do 2027–2028
- Fuzja kamera+radar+LiDAR = bezpieczniejszy HRI niż kamera alone
- Normalizacja i datasety to największe pozatechniczne luki

Literatura

[1] Aptiv (2024). SRR8+ Product Datasheet v3.2. Aptiv PLC Technical Library

[2] Acconeer (2024). XM125 Pulsed Coherent Radar — Module Datasheet Rev.1.4

[3] Ahmad S. et al. (2021). RadHAR: Human Activity Recognition from Point Clouds Generated through a Radar. IEEE Trans. MTT 69(3), 1727–1739

[4] Hernandez-Cardoso G. et al. (2017). Terahertz imaging for early screening of diabetic foot syndrome. Sci. Advances 3(e1701423)

[5] ETSI EN 303 686 V1.1.1 (2023). Short Range Devices; UWB; Harmonised Standard for SRDs using UWB in band 116–246 GHz

[6] Sun S. et al. (2020). Millimeter Wave Radar-Based Human Body Tracking. IEEE Sensors J. 20(20), 12116–12126

[7] Yole Développement (2024). THz Technology Market Report 2024. Market & Technology Report

[8] Cheng Y. et al. (2023). 300 GHz SiGe BiCMOS Radar Transceiver Chip. IEEE JSSC 58(4), 944–957

[9] ISO/TS 15066:2016. Robots and robotic devices — Collaborative robots. ISO Geneva

[10] FCC Report and Order (2019). Spectrum Horizons — Unlicensed operations above 95 GHz. FCC-19-19