



Politechnika
Wrocławska

Wybrane zagadnienia robotyki

Wykład 2

Projektowanie systemów robotycznych

Janusz Jakubiak

KCiR, W12, PWr

Copyright © J. Jakubiak 2026



HR EXCELLENCE IN RESEARCH

Zawartość wykładu

- ▶ Robot jako system
- ▶ Definiowanie wymagań
- ▶ Specyfikacja systemu
- ▶ Elementy systemu ROS wspomagające realizację systemów
- ▶ Przykład

Robot jako system

Z czego składa się robot?

- ▶ Mechanika – kinematyka, dynamika, materiały, przeniesienie napędu.
- ▶ Elektronika – sensoryka, zasilanie, komunikacja niskopoziomowa.
- ▶ Informatyka – percepcja, estymacja, planowanie, sterowanie.
- ▶ (Otoczenie)

Czy same powyższe elementy wystarczą?

System of systems

Zachowanie robota nie wynika z samego oprogramowania czy samej mechaniki, lecz z ich **interakcji** (emergencja).

„System” w robotyce

System [Blanchard&Fabrycky]

Zbiór powiązanych elementów działających wspólnie w celu osiągnięcia określonego celu.

System robotyczny [ISO 8373:2021]

System robotyczny to zestaw obejmujący:

- ▶ robota (mechanizm manipulacyjny/mobilny),
- ▶ efektory,
- ▶ czujniki i wyposażenie dodatkowe,
- ▶ oprogramowanie,

potrzebne do realizacji założonego zadania.

„System” w robotyce

Kluczowe cechy systemu robotycznego

- ▶ Struktura – hierarchia podsystemów.
- ▶ Interakcja – wymiana informacji i energii.
- ▶ Granica systemu – separacja robota i jego otoczenia.

Rola Inżynierii Systemów (Systems Engineering)

Główne zadanie Inżynierii Systemów

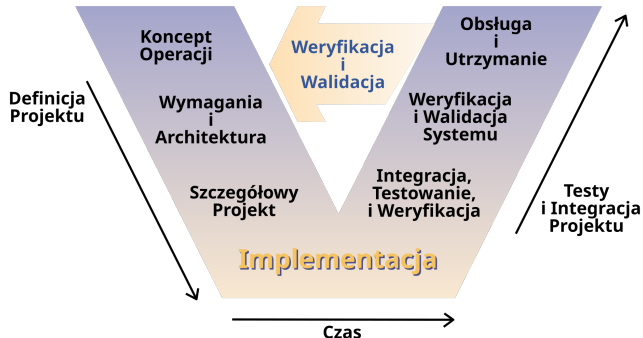
Realizacja podejścia holistycznego: zapewnienie, że wszystkie komponenty są ze sobą kompatybilne (interfejsy) i wspólnie realizują zadanie systemu.

Kluczowe aspekty: zarządzanie złożonością, optymalizacja globalna (zamiast lokalnej).

Dlaczego potrzebujemy SE w robotyce?

- ▶ Zarządzanie interdyscyplinarnością – integracja mechaniki, elektroniki i oprogramowania.
- ▶ Zarządzanie wymaganiami – przeniesienie potrzeb klienta i ograniczeń, np. prawnych, na parametry techniczne
- ▶ Wczesne wykrywanie błędów – koszt poprawy błędu rośnie wraz z etapem projektu, na którym błąd został wykryty.

Model "V" – Kręgosłup Projektu



Leon Osborne, Jeffrey Brummond, Robert Hart, Mohsen (Moe) Zarean Ph.D., P.E, Steven Conger ;
Redrawn by User:Slashme.

Analiza wymagań

Perspektywy definiowania wymagań

- ▶ Wymagania użytkownika (business/user requirements)
 - ▶ Co robot ma robić?
 - ▶ W jaki sposób ma komunikować się z użytkownikiem (HMI/HRI – Human-Machine(Robot) Interface).
- ▶ Wymagania prawne i normatywne (compliance)
 - ▶ Bezpieczeństwo fizyczne (safety): dyrektywa maszynowa [ISO 10218].
 - ▶ Kompatybilność i widmo: Radio Equipment Directive (RED) [2014/53/UE].
 - ▶ Cyberbezpieczeństwo (Cybersecurity): art. 3.3 RED, Cyber Resilience Act (CRA) [2024/2847/UE]
 - ▶ Certyfikacja (znak CE), normy higieniczne (szpitale, żywność).
 - ▶ Prywatność (RODO/GDPR).
- ▶ Wymagania Techniczne
 - ▶ Parametry mierzalne: udźwig, powtarzalność, czas cyklu.
 - ▶ Komunikacja, zasilanie, stopień ochrony (IP).

Ograniczenia otoczenia (Environmental Constraints)

Operacyjny zakres działania (Operational Design Domain/ODD)

- ▶ Warunki fizyczne
 - ▶ Rodzaj podłoża (pryczepność, progi).
 - ▶ Oświetlenie (krytyczne dla systemów wizyjnych).
 - ▶ Zapylenie, wilgotność, temperatura.
- ▶ Interakcje dynamiczne
 - ▶ Obecność ludzi (wymagana współpraca/separacja).
 - ▶ Infrastruktura IT (zasięg WiFi, dostęp do wind).
 - ▶ Inne systemy zautomatyzowane.

Im mniej przewidywalne otoczenie, tym większe wymagania stawiane percepcji systemu, aby spełnić wymagania bezpieczeństwa.

używa się też: operacyjna domena projektowa

Specyfikacja systemu

Specyfikacja techniczna

Transformacja ogólnych wymagań na mierzalne parametry inżynierskie

Kluczowe metryki w robotyce

- ▶ Kinematyczne – Zakresy ruchu (DOF), prędkości, przyspieszenia.
- ▶ Dynamiczne – Udźwig nominalny i maksymalny, momenty bezwładności.
- ▶ Dokładnościowe – Rozdzielczość, dokładność, powtarzalność.
- ▶ Elektryczne – Szczytowy pobór mocy, pojemność energetyczna, poziomy napięcie.

Specyfikacja systemu

Cechy dobrej specyfikacji

- ▶ Atomowa – dotyczy tylko jednego parametru
- ▶ Mierzalna – musi istnieć pomiar/test jednoznacznie określający spełnienie wymagania
- ▶ Możliwa do prześledzenia – istnieje powiązanie parametru technicznego z konkretnym wymaganiem

Przykład

Wymaganie: Robot musi pracować całą zmianę

Specyfikacja: Akumulator LiFePO₄ 48V, min. 60Ah; pobór mocy w spoczynku < 50W

Wymaganie: Robot powinien poruszać się z prędkością człowieka

Specyfikacja systemu

Rodzaje specyfikacji

- ▶ funkcjonalna – definiuje zachowanie robota w odpowiedzi na zdarzenia
- ▶ wydajnościowa – określa ograniczenia fizyczne
- ▶ interfejsów – określa połączenia, protokoły komunikacyjne

Specyfikacja interfejsów

Specyfikacja Interfejsów (Interface Control Document(ICD))

Formalny dokument opisujący granice i połączenia między podsystemami

- ▶ Interfejsy Mechaniczne: punkty mocowania, wymiary, waga, tolerancje, odprowadzanie ciepła.
- ▶ Interfejsy Elektryczne: typy złączy, poziomy napięć, pinouty, maksymalne natężenie prądu, ekranowanie.
- ▶ Interfejsy Programowe (Logiczne): protokoły (CAN, ROS2), struktura ramek danych, częstotliwość publikacji wiadomości (Hz), czasy odpowiedzi (latency).

także: Dokumentacja Kontroli Interfejsów, Protokół Uzgodnień Międzyfunkcyjnych

Rola ICD w zarządzaniu projektem

Pozwala na równoległą pracę zespołów. Jeśli ICD jest ustalone (i realizowane) zespoły mogą realizować swoje zadania równolegle, z gwarancją kompatybilności podczas finalnej integracji.

ROS a implementacja wymagań systemowych

Elementy ROS ułatwiające implementację systemów

- ▶ **Modułowość:** realizacja dekompozycji systemu przez węzły (nodes); każda funkcja to izolowany proces z określonym interfejsem.
- ▶ **Standaryzacja interfejsów:**
 - ▶ Implementacja ICD przez silnie typowane wiadomości.
 - ▶ Współdzielenie standardów (np. `cmd_vel`).
- ▶ **Komunikacja:** komunikacja realizowana przez ROS, niezależna od języka implementacji modułów (C++/Python).
- ▶ **Narzędzia diagnostyczne i logowanie**

Przykład:

Problem: Robot mobilny transportujący leki w szpitalu bezpośrednio do pacjentów.

Podsumowanie

- ▶ Robot to nie tylko zbiór komponentów, ale system, w którym bardzo ważne są interakcje między komponentami
- ▶ Projektowanie systemów robotycznych wymaga analizy wielu aspektów, z różnych dziedzin
- ▶ Wymagania należy zdefiniować tak, by łatwo było zweryfikować ich spełnienie
- ▶ Prawidłowy ICD jest kluczowy dla efektywnej realizacji projektów robotycznych