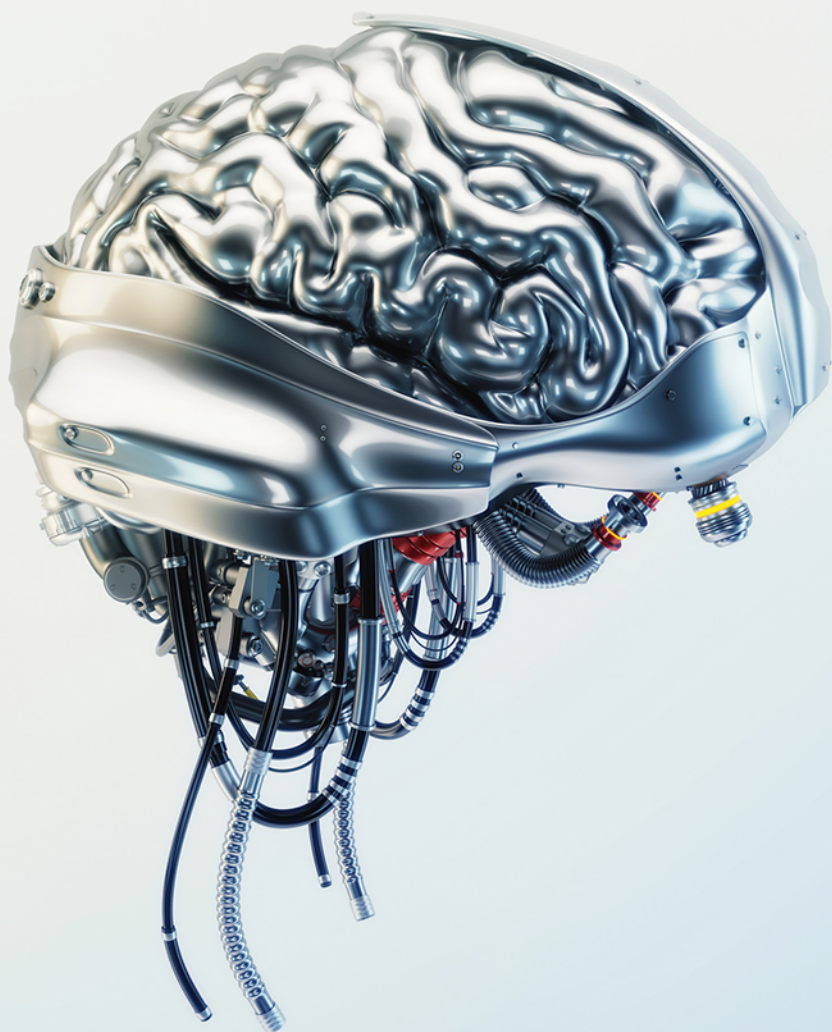


Mordechai Ben-Ari, Francesco Mondada

# ELEMENTY ROBOTYKI

dla początkujących



Tytuł oryginału: Elements of Robotics

Tłumaczenie: Krzysztof Sawka

Projekt okładki: Studio Gravite / Olsztyn; Obarek, Pokoński, Pazdrijowski, Zapucki

ISBN: 978-83-283-8823-9

© Mordechai Ben-Ari, Francesco Mondada 2018

This book is an open access publication.

Open Access This book is licensed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>), which permits use, sharing, adaptation, distribution and reproduction in any medium or format, as long as you give appropriate credit to the original author(s) and the source, provide a link to the Creative Commons license and indicate if changes were made.

Polish edition copyright © 2022 by Helion S.A.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced or transmitted in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopying, recording or by any information storage retrieval system, without permission from the Publisher.

Wszelkie prawa zastrzeżone. Nieautoryzowane rozpowszechnianie całości lub fragmentu niniejszej publikacji w jakiegokolwiek postaci jest zabronione. Wykonywanie kopii metodą kserograficzną, fotograficzną, a także kopiowanie książki na nośniku filmowym, magnetycznym lub innym powoduje naruszenie praw autorskich niniejszej publikacji.

Wszystkie znaki występujące w tekście są zastrzeżonymi znakami firmowymi bądź towarowymi ich właścicieli.

Autor oraz wydawca dołożyli wszelkich starań, by zawarte w tej książce informacje były kompletne i rzetelne. Nie biorą jednak żadnej odpowiedzialności ani za ich wykorzystanie, ani za związane z tym ewentualne naruszenie praw patentowych lub autorskich. Autor oraz wydawca nie ponoszą również żadnej odpowiedzialności za ewentualne szkody wynikłe z wykorzystania informacji zawartych w książce.

Helion S.A.

ul. Kościuszki 1c, 44-100 Gliwice

tel. 32 231 22 19, 32 230 98 63

e-mail: [helion@helion.pl](mailto:helion@helion.pl)

WWW: <https://helion.pl> (księgarnia internetowa, katalog książek)

Drogi Czytelniku!

Jeżeli chcesz ocenić tę książkę, zajrzyj pod adres

<https://helion.pl/user/opinie/elropo>

Możesz tam wpisać swoje uwagi, spostrzeżenia, recenzję.

Printed in Poland.

- [Kup książkę](#)
- [Poleć książkę](#)
- [Oceń książkę](#)

- [Księgarnia internetowa](#)
- [Lubię to! » Nasza społeczność](#)

# Spis treści

|                       |           |
|-----------------------|-----------|
| <b>Przedmowa.....</b> | <b>11</b> |
|-----------------------|-----------|

|                                                    |           |
|----------------------------------------------------|-----------|
| <b>Rozdział 1. Roboty i ich zastosowania .....</b> | <b>15</b> |
|----------------------------------------------------|-----------|

|                                        |    |
|----------------------------------------|----|
| 1.1. Klasyfikacja robotów .....        | 15 |
| 1.2. Roboty przemysłowe .....          | 17 |
| 1.3. Autonomiczne roboty mobilne ..... | 18 |
| 1.4. Roboty humanoidalne.....          | 20 |
| 1.5. Roboty edukacyjne .....           | 20 |
| 1.6. Robot ogólny .....                | 23 |
| 1.6.1. Napęd różnicowy.....            | 24 |
| 1.6.2. Czujniki zbliżeniowe.....       | 25 |
| 1.6.3. Czujniki podłoża .....          | 26 |
| 1.6.4. Wbudowany komputer .....        | 26 |
| 1.7. Formalizm algorytmiczny .....     | 27 |
| 1.8. Przegląd treści książki .....     | 28 |
| 1.9. Podsumowanie.....                 | 31 |
| 1.10. Literatura uzupełniająca .....   | 32 |
| Bibliografia.....                      | 32 |

|                                  |           |
|----------------------------------|-----------|
| <b>Rozdział 2. Czujniki.....</b> | <b>33</b> |
|----------------------------------|-----------|

|                                                       |    |
|-------------------------------------------------------|----|
| 2.1. Podział czujników.....                           | 34 |
| 2.2. Czujniki odległości .....                        | 34 |
| 2.2.1. Ultradźwiękowe czujniki odległości .....       | 35 |
| 2.2.2. Czujniki zbliżeniowe na podczerwień .....      | 35 |
| 2.2.3. Optyczne czujniki odległości .....             | 36 |
| 2.2.4. Czujniki triangulacyjne .....                  | 38 |
| 2.2.5. Skanery laserowe .....                         | 39 |
| 2.3. Kamery.....                                      | 41 |
| 2.4. Pozostałe czujniki .....                         | 43 |
| 2.5. Zakres, rozdzielczość, precyzja, dokładność..... | 44 |

|        |                                |    |
|--------|--------------------------------|----|
| 2.6.   | Nieliniowość .....             | 45 |
| 2.6.1. | Czujniki liniowe.....          | 46 |
| 2.6.2. | Czujniki nieliniowe .....      | 46 |
| 2.7.   | Podsumowanie.....              | 48 |
| 2.8.   | Literatura uzupełniająca ..... | 48 |
|        | Bibliografia .....             | 48 |

### **Rozdział 3. Zachowanie reaktywne ..... 49**

|        |                                                                   |    |
|--------|-------------------------------------------------------------------|----|
| 3.1.   | Pojazdy Braitenberga .....                                        | 49 |
| 3.2.   | Reagowanie na wykrycie obiektu .....                              | 50 |
| 3.3.   | Reagowanie i skręcanie .....                                      | 52 |
| 3.4.   | Podążanie za linią .....                                          | 53 |
| 3.4.1. | Podążanie za linią za pomocą dwóch czujników podłoża .....        | 54 |
| 3.4.2. | Podążanie za linią za pomocą tylko jednego czujnika podłoża ..... | 57 |
| 3.4.3. | Bezgradientowe podążanie za linią .....                           | 58 |
| 3.5.   | Prezentacja pojazdów Braitenberga .....                           | 60 |
| 3.6.   | Podsumowanie.....                                                 | 61 |
| 3.7.   | Literatura uzupełniająca .....                                    | 61 |
|        | Bibliografia .....                                                | 61 |

### **Rozdział 4. Maszyny stanów skończonych..... 62**

|      |                                              |    |
|------|----------------------------------------------|----|
| 4.1. | Maszyny stanowe .....                        | 62 |
| 4.2. | Zachowanie reaktywne sterowane stanem .....  | 63 |
| 4.3. | Szukaj i podjedź .....                       | 64 |
| 4.4. | Implementacja maszyn stanów skończonych..... | 65 |
| 4.5. | Podsumowanie.....                            | 67 |
| 4.6. | Literatura uzupełniająca .....               | 67 |
|      | Bibliografia .....                           | 67 |

### **Rozdział 5. Ruch robota i odometria ..... 68**

|        |                                                               |    |
|--------|---------------------------------------------------------------|----|
| 5.1.   | Droga, prędkość i czas .....                                  | 69 |
| 5.2.   | Przyspieszenie jako zmiana prędkości.....                     | 70 |
| 5.3.   | Od odcinków do ruchu ciągłego.....                            | 72 |
| 5.4.   | Nawigacja za pomocą odometrii .....                           | 73 |
| 5.5.   | Odometria liniowa.....                                        | 74 |
| 5.6.   | Odometryczne mierzenie zakrętów .....                         | 75 |
| 5.7.   | Błędy odometryczne.....                                       | 77 |
| 5.8.   | Kodery (enkodery) kół.....                                    | 80 |
| 5.9.   | Bezwładnościowe systemy nawigacji .....                       | 81 |
| 5.9.1. | Akcelerometry (przyspieszeniomierze).....                     | 82 |
| 5.9.2. | Żyroskopy.....                                                | 83 |
| 5.9.3. | Zastosowania.....                                             | 85 |
| 5.10.  | Stopnie swobody a liczba elementów wykonawczych .....         | 85 |
| 5.11.  | Względna liczba elementów wykonawczych i stopni swobody ..... | 87 |

|                                                 |    |
|-------------------------------------------------|----|
| 5.12. Ruch holonomiczny i nieholonomiczny ..... | 91 |
| 5.13. Podsumowanie.....                         | 96 |
| 5.14. Literatura uzupełniająca .....            | 96 |
| Bibliografia .....                              | 96 |

## **Rozdział 6. Sterowanie..... 97**

|                                                             |     |
|-------------------------------------------------------------|-----|
| 6.1. Modele sterowania.....                                 | 97  |
| 6.1.1. Sterowanie w pętli otwartej.....                     | 98  |
| 6.1.2. Sterowanie w pętli zamkniętej.....                   | 98  |
| 6.1.3. Okres algorytmu sterowania.....                      | 99  |
| 6.2. Sterowanie typu „on-off”.....                          | 100 |
| 6.3. Regulator proporcjonalny .....                         | 102 |
| 6.4. Regulator proporcjonalno-całkujący .....               | 105 |
| 6.5. Sterownik proporcjonalno-całkująco-różniczkujący ..... | 107 |
| 6.6. Podsumowanie.....                                      | 109 |
| 6.7. Literatura uzupełniająca .....                         | 109 |
| Bibliografia .....                                          | 109 |

## **Rozdział 7. Nawigacja lokalna: omijanie przeszkód ..... 110**

|                                                                          |     |
|--------------------------------------------------------------------------|-----|
| 7.1. Unikanie przeszkód.....                                             | 111 |
| 7.1.1. Podążanie wzdłuż ściany .....                                     | 111 |
| 7.1.2. Ukierunkowane podążanie wzdłuż ściany.....                        | 113 |
| 7.1.3. Algorytm Pledge’a .....                                           | 114 |
| 7.2. Podążanie wzdłuż oznakowanej linii .....                            | 115 |
| 7.3. Mrówki poszukujące źródła pożywienia .....                          | 117 |
| 7.4. Model probabilistyczny zachowania mrówek .....                      | 119 |
| 7.5. Maszyna stanów skończonych dla algorytmu wyszukiwania ścieżki ..... | 121 |
| 7.6. Podsumowanie.....                                                   | 123 |
| 7.7. Literatura uzupełniająca .....                                      | 124 |
| Bibliografia .....                                                       | 124 |

## **Rozdział 8. Lokalizacja ..... 125**

|                                                                        |     |
|------------------------------------------------------------------------|-----|
| 8.1. Punkty charakterystyczne.....                                     | 125 |
| 8.2. Określanie pozycji na podstawie obiektów o znanym położeniu ..... | 126 |
| 8.2.1. Określanie położenia za pomocą kąta i odległości .....          | 126 |
| 8.2.2. Określanie położenia za pomocą triangulacji .....               | 127 |
| 8.3. Globalny system pozycjonowania .....                              | 128 |
| 8.4. Lokalizacja probabilistyczna .....                                | 129 |
| 8.4.1. Pomiary czujników zwiększają pewność.....                       | 130 |
| 8.4.2. Niepewność w pomiarach .....                                    | 132 |
| 8.5. Niepewność ruchu .....                                            | 135 |
| 8.6. Podsumowanie.....                                                 | 137 |
| 8.7. Literatura uzupełniająca .....                                    | 137 |
| Bibliografia .....                                                     | 137 |

|                                                                                    |                |
|------------------------------------------------------------------------------------|----------------|
| <b>Rozdział 9. Budowanie map .....</b>                                             | <b>138</b>     |
| 9.1. Mapy dyskretne i ciągłe .....                                                 | 139            |
| 9.2. Zawartość komórek na mapie z siatką współrzędnych .....                       | 140            |
| 9.3. Tworzenie mapy przez eksplorację: algorytm rubieżowy .....                    | 141            |
| 9.3.1. Mapa z siatką współrzędnych i prawdopodobieństwami obłożenia .....          | 141            |
| 9.3.2. Algorytm rubieżowy .....                                                    | 142            |
| 9.3.3. Priorytet w algorytmie rubieżowym .....                                     | 146            |
| 9.4. Budowanie mapy na podstawie znajomości środowiska .....                       | 147            |
| 9.5. Przykład numeryczny algorytmu SLAM.....                                       | 150            |
| 9.6. Czynności ukazujące działanie algorytmu SLAM.....                             | 155            |
| 9.7. Formalizacja algorytmu SLAM.....                                              | 157            |
| 9.8. Podsumowanie.....                                                             | 158            |
| 9.9. Literatura uzupełniająca .....                                                | 158            |
| Bibliografia.....                                                                  | 159            |
| <br><b>Rozdział 10. Nawigacja na podstawie map .....</b>                           | <br><b>160</b> |
| 10.1. Algorytm Dijkstry dla map z siatką współrzędnych .....                       | 160            |
| 10.1.1. Algorytm Dijkstry dla map z siatką współrzędnych o stałym koszcie .....    | 161            |
| 10.1.2. Algorytm Dijkstry dla map z siatką współrzędnych o zmiennych kosztach..... | 163            |
| 10.2. Algorytm Dijkstry dla map ciągłych .....                                     | 165            |
| 10.3. Planowanie trasy za pomocą algorytmu $A^*$ .....                             | 167            |
| 10.4. Podążanie za ścieżką i unikanie przeszkód .....                              | 171            |
| 10.5. Podsumowanie.....                                                            | 172            |
| 10.6. Literatura uzupełniająca .....                                               | 172            |
| Bibliografia.....                                                                  | 172            |
| <br><b>Rozdział 11. Sterowanie za pomocą logiki rozmytej .....</b>                 | <br><b>173</b> |
| 11.1. Rozmycie.....                                                                | 174            |
| 11.2. Stosowanie reguł.....                                                        | 174            |
| 11.3. Wyostrzenie.....                                                             | 175            |
| 11.4. Podsumowanie.....                                                            | 177            |
| 11.5. Literatura uzupełniająca .....                                               | 177            |
| Bibliografia.....                                                                  | 177            |
| <br><b>Rozdział 12. Przetwarzanie obrazów .....</b>                                | <br><b>178</b> |
| 12.1. Otrzymywanie obrazów.....                                                    | 179            |
| 12.2. Przegląd typów przetwarzania obrazów cyfrowych.....                          | 180            |
| 12.3. Usprawnianie obrazów .....                                                   | 181            |
| 12.3.1. Filtry przestrzenne .....                                                  | 182            |
| 12.3.2. Manipulowanie histogramem .....                                            | 184            |
| 12.4. Wykrywanie krawędzi.....                                                     | 186            |
| 12.5. Wykrywanie rogów .....                                                       | 188            |
| 12.6. Wykrywanie plam.....                                                         | 190            |

|                                      |     |
|--------------------------------------|-----|
| 12.7. Podsumowanie.....              | 192 |
| 12.8. Literatura uzupełniająca ..... | 193 |
| Bibliografia.....                    | 193 |

## **Rozdział 13. Sieci neuronowe..... 194**

|                                                                   |     |
|-------------------------------------------------------------------|-----|
| 13.1. Biologiczny układ nerwowy .....                             | 194 |
| 13.2. Model sztucznej sieci neuronowej.....                       | 195 |
| 13.3. Implementacja pojazdu Braitenberga za pomocą sieci ANN..... | 197 |
| 13.4. Sztuczne sieci neuronowe: topologie .....                   | 200 |
| 13.4.1. Topologia wielowarstwowa .....                            | 200 |
| 13.4.2. Pamięć.....                                               | 201 |
| 13.4.3. Filtr przestrzenny .....                                  | 202 |
| 13.5. Uczenie.....                                                | 204 |
| 13.5.1. Rodzaje algorytmów uczących .....                         | 204 |
| 13.5.2. Reguła Hebb'a w uczeniu sieci neuronowych .....           | 205 |
| 13.6. Podsumowanie.....                                           | 209 |
| 13.7. Literatura uzupełniająca .....                              | 209 |
| Bibliografia.....                                                 | 209 |

## **Rozdział 14. Uczenie maszynowe..... 210**

|                                                                    |     |
|--------------------------------------------------------------------|-----|
| 14.1. Rozróżnianie dwóch kolorów .....                             | 211 |
| 14.1.1. Wyróżnik otrzymany na podstawie średnich .....             | 212 |
| 14.1.2. Wyróżnik otrzymany na podstawie średnich i wariancji ..... | 214 |
| 14.1.3. Algorytm służący do nauki rozpoznawania kolorów.....       | 215 |
| 14.2. Liniowa analiza dyskryminacyjna .....                        | 217 |
| 14.2.1. Motywacja .....                                            | 217 |
| 14.2.2. Wyróżnik liniowy.....                                      | 218 |
| 14.2.3. Wybór punktu dla wyróżnika liniowego .....                 | 219 |
| 14.2.4. Wybór współczynnika kierunkowego.....                      | 220 |
| 14.2.5. Obliczanie wyróżnika liniowego: przykład numeryczny.....   | 223 |
| 14.2.6. Porównywanie jakości wyróżników .....                      | 225 |
| 14.2.7. Czynności związane z analizą LDA .....                     | 226 |
| 14.3. Uogólnienie wyróżnika liniowego.....                         | 228 |
| 14.4. Perceptrony .....                                            | 228 |
| 14.4.1. Wykrywanie zboczy.....                                     | 229 |
| 14.4.2. Klasyfikacja za pomocą perceptronów .....                  | 230 |
| 14.4.3. Uczenie perceptronu.....                                   | 231 |
| 14.4.4. Przykład numeryczny .....                                  | 232 |
| 14.4.5. Strojenie parametrów perceptronu.....                      | 234 |
| 14.5. Podsumowanie.....                                            | 235 |
| 14.6. Literatura uzupełniająca .....                               | 235 |
| Bibliografia.....                                                  | 235 |

|                                                                                   |                |
|-----------------------------------------------------------------------------------|----------------|
| <b>Rozdział 15. Robotyka roju .....</b>                                           | <b>236</b>     |
| 15.1. Strategie koordynowania współpracy robotów .....                            | 237            |
| 15.2. Koordynacja na podstawie lokalnej wymiany informacji .....                  | 238            |
| 15.2.1. Komunikacja bezpośrednia .....                                            | 238            |
| 15.2.2. Komunikacja pośrednia .....                                               | 238            |
| 15.2.3. Algorytm BeeClust .....                                                   | 240            |
| 15.2.4. Implementacja algorytmu BeeClust przez projekt ASSISibf .....             | 241            |
| 15.3. Robotyka roju wykorzystująca oddziaływania fizyczne .....                   | 242            |
| 15.3.1. Współpraca przy fizycznym zadaniu .....                                   | 242            |
| 15.3.2. Łączenie sił wielu robotów .....                                          | 243            |
| 15.3.3. Zbiorowe przesuwanie z użyciem okluzji .....                              | 245            |
| 15.4. Podsumowanie .....                                                          | 247            |
| 15.5. Literatura uzupełniająca .....                                              | 248            |
| Bibliografia .....                                                                | 248            |
| <br><b>Rozdział 16. Kinematyka manipulatora robotycznego .....</b>                | <br><b>249</b> |
| 16.1. Kinematyka prosta .....                                                     | 250            |
| 16.2. Kinematyka odwrotna .....                                                   | 252            |
| 16.3. Rotacje .....                                                               | 255            |
| 16.3.1. Rotacja wektora .....                                                     | 256            |
| 16.3.2. Rotacja układu współrzędnych .....                                        | 257            |
| 16.3.3. Przekształcenie wektora z jednego układu współrzędnych do innego .....    | 258            |
| 16.4. Rotacja i translacja układu współrzędnych .....                             | 261            |
| 16.5. Przedsmak rotacji trójwymiarowych .....                                     | 263            |
| 16.5.1. Rotacje wokół trzech osi .....                                            | 263            |
| 16.5.2. Reguła prawej dłoni .....                                                 | 265            |
| 16.5.3. Macierze trójwymiarowych obrotów .....                                    | 266            |
| 16.5.4. Rotacje wielokrotne .....                                                 | 266            |
| 16.5.5. Kąty Eulera .....                                                         | 267            |
| 16.5.6. Liczba oddzielnych rotacji kątów Eulera .....                             | 269            |
| 16.6. Zaawansowane zagadnienia związane z przekształceniami trójwymiarowymi ..... | 269            |
| 16.7. Podsumowanie .....                                                          | 270            |
| 16.8. Literatura uzupełniająca .....                                              | 270            |
| Bibliografia .....                                                                | 270            |
| <br><b>Dodatek A. Jednostki miary .....</b>                                       | <br><b>271</b> |
| <b>Dodatek B. Podstawy matematyczne .....</b>                                     | <b>273</b>     |

## Rozdział 1.

# Roboty i ich zastosowania

Teoretycznie każdy z nas wie, czym jest robot, trudno jednak podać jego dokładną definicję. Oksfordzki słownik języka angielskiego zawiera następujące objaśnienie: „Maszyna wykonująca automatycznie zestaw skomplikowanych czynności, w szczególności programowana za pomocą komputera”. Z tej definicji możemy wyciągnąć pewne interesujące wnioski:

- „Wykonująca automatycznie czynności”. Jest to kluczowa zasada działania robotów, ale także wielu prostszych maszyn zwanych automatami. Różnica pomiędzy robotem a prostym automatem takim jak zmywarka mieści się w definicji „zestawu skomplikowanych czynności”. Czy pranie ubrań składa się z zestawu skomplikowanych czynności? Czy lot samolotem na autopilocie jest skomplikowaną czynnością? Czy pieczenie chleba jest skomplikowane? Wszystkie te zadania realizują maszyny stanowiące coś pośredniego pomiędzy automatami a robotami.
- „Programowana za pomocą komputera”. Jest to kolejna kluczowa cecha robota, ponieważ niektóre automaty są programowane mechanicznie i cechują się niewielką elastycznością. Z kolei komputery są wszechobecne, dlatego trudno jest za pomocą tego kryterium odróżniać robota od innej maszyny.

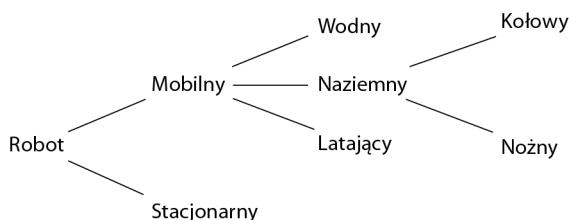
Następną zasadniczą właściwością robota, która nie została jawnie podana w powyższej definicji, jest korzystanie z czujników. Większość automatów nie zawiera czujników i nie może dostosowywać swoich działań do środowiska. To właśnie czujniki umożliwiają robotom wykonywanie skomplikowanych zadań.

W podrozdziałach 1.1 – 1.5 prezentujemy krótki opis różnych typów robotów. W podrozdziale 1.6 opisujemy stosowanego przez nas robota ogólnego, natomiast w podrozdziale 1.7 zapoznasz się z pseudokodem używanym do formalizowania algorytmów. Podrozdział 1.8 zawiera szczegółowy opis treści książki.

## 1.1. Klasyfikacja robotów

Roboty można klasyfikować na podstawie środowiska, w którym wykonują zadania (rysunek 1.1). Największa różnica występuje pomiędzy robotami **stacjonarnymi** a **mobilnymi**. Obydwa typy robotów przeznaczone są do różnych środowisk, dlatego cechują się zupełnie odmiennymi właściwościami. Roboty stacjonarne to głównie robotyczne

manipulatory przemysłowe pracujące w ściśle zdefiniowanych środowiskach dostosowanych do robotów. Roboty przemysłowe wykonują określone powtarzalne czynności, takie jak spawanie lub malowanie części w fabrykach samochodów. Dzięki coraz lepszym czujnikom i urządzeniom umożliwiającym oddziaływanie pomiędzy człowiekiem a robotem manipulatory robotyczne są coraz częściej używane w słabiej kontrolowanych środowiskach, np. w operacjach chirurgicznych wymagających dużej precyzji.



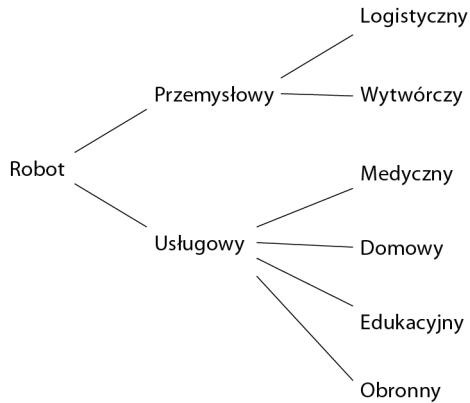
**Rysunek 1.1.** Klasyfikacja robotów na podstawie środowiska i mechanizmu oddziaływania z nim

Z kolei roboty mobilne mogą się poruszać i realizować zadania w dużych, słabo zdefiniowanych i niepewnych środowiskach, które nie są stworzone z myślą o robotach. Muszą sobie radzić w sytuacjach, które nie są odgórnie znane i które zmieniają się w miarę upływu czasu. W niektórych środowiskach mogą występować nieprzewidywalne byty, takie jak ludzie czy zwierzęta. Przykładami robotów mobilnych są inteligentny odkurzacz czy autonomiczne samochody.

Nie ma wyraźnego podziału pomiędzy zadaniami wykonywanymi przez roboty stacjonarne i mobilne (ludzie mogą oddziaływać z robotami stacjonarnymi, a ruch robotów mobilnych można ograniczyć do poruszania się po szynach), warto jednak uznać, że obydwie klasy robotów są diametralnie różne. W szczególności roboty stacjonarne są zamontowane stabilnie do podłoża, mogą więc obliczać swoje położenie na podstawie własnego stanu wewnętrznego, natomiast roboty mobilne muszą w tym celu polegać na postrzeganiu otoczenia.

Istnieją trzy główne środowiska robotów mobilnych wymagające skrajnie odmiennych rozwiązań konstrukcyjnych związanych z ruchem: wodne (roboty poruszające się pod wodą), naziemne (samochody) i latające (drony). Również w tym przypadku podział jest umowny, ponieważ istnieją roboty wodno-lądowe, poruszające się zarówno w wodzie, jak i na lądzie. Możemy dokonać dalszego podziału przedstawicieli każdego z tych trzech środowisk: roboty naziemne mogą mieć koła, nogi lub poruszać się po torach, natomiast roboty latające mogą być lżejszymi od powietrza balonami lub cięższymi od niego obiektami latającymi, które z kolei dzielimy na roboty stałopłatowe lub wiropłatowe (helikoptery).

Roboty możemy podzielić ze względu na obszar zastosowań i wykonywane zadania (rysunek 1.2). Wspomnieliśmy o robotach przemysłowych pracujących w ściśle zdefiniowanych środowiskach nad zadaniami produkcyjnymi. Pierwsze roboty należały do tej kategorii, ponieważ ściśle zdefiniowane środowisko pozwalało uprościć ich konstrukcję. Z kolei roboty usługowe wspomagają ludzi w realizowanych przez nich zadaniach. Zaliczamy tu takie obowiązki domowe, jak odkurzanie, zadania transportowe za pomocą samochodów autonomicznych, a także zastosowania obronne, np. za pomocą dronów zwiadowczych. Również w medycynie coraz częściej wykorzystywane są roboty podczas operacji, rehabilitacji i nauki. Są to współczesne zastosowania wymagające udoskonalonych czujników i bliższej współpracy z użytkownikiem.



**Rysunek 1.2.** Klasyfikacja robotów na podstawie obszaru zastosowań

## 1.2. Roboty przemysłowe

Roboty przemysłowe były pierwszymi robotami, które zaprojektowano w celu zastąpienia ludzkich pracowników wykonujących proste, powtarzalne czynności. Linie montażowe w fabrykach mogą działać bez udziału człowieka, w ściśle zdefiniowanym środowisku, w którym robot musi realizować zadania w określonej kolejności na obiektach umieszczonych precyzyjnie naprzeciwko niego (rysunek 1.3).



**Rysunek 1.3.** Roboty na linii montażowej w fabryce samochodów.

Źródło: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:KUKA\\_Industrial\\_Robots\\_IR.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:KUKA_Industrial_Robots_IR.jpg) autorstwa Mixabest (praca własna). Licencja CC BY-SA 3.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/deed.pl>) lub GFDL (<http://www.gnu.org/licenses/fdl-1.3.html>) poprzez Wikimedia Commons

Można się spierać o to, czy roboty przemysłowe są już robotami, czy jeszcze automata-  
tami. Jednak współczesne automaty są tak bardzo uzależnione od czujników, że można  
je uznać za roboty. Nie zmienia to faktu, że ich konstrukcja jest uproszczona z powodu  
pracy w odpowiednio dostosowanym środowisku, do którego ludzie nie mają wstępu  
podczas pracy robota.

Jednakże współczesne roboty wymagają większej elastyczności, np. możliwości ma-  
nipulowania obiektami w różnych położeniach lub rozpoznawania różnych obiektów,  
które należy umieszczać we właściwej kolejności. Robot może mieć za zadanie przenosić  
towar pomiędzy magazynami. Oznacza to dodatkową autonomię, ale podstawowe zało-  
żenie pozostaje niezmiennie: środowisko jest mniej lub bardziej ograniczone oraz można  
je dostosować do robota.

Dodatkowa elastyczność jest wymagana wtedy, gdy roboty przemysłowe oddziałują  
z ludźmi, a to oznacza wprowadzenie dodatkowych wymogów bezpieczeństwa, zarówno  
w przypadku ramion robota, jak i robotów mobilnych. Należy zwłaszcza zmniejszyć szyb-  
kość robota, a do tego musi być tak zaprojektowany, żeby ruchome części nie stanowiły  
zagrożenia dla użytkownika. Zaletą współpracy ludzi z robotami jest maksymalizacja wy-  
dajności obydwu grup w tym, co potrafią najlepiej: roboty realizują powtarzalne i niebez-  
pieczne zadania, natomiast ludzie zajmują się bardziej skomplikowanymi pracami i defi-  
niują całokształt zadań robota, ponieważ szybko dostrzegają błędy i możliwości ich poprawy.

### 1.3. Autonomiczne roboty mobilne

Wiele robotów mobilnych jest zdalnie sterowanych podczas wykonywania takich zadań  
jak sprawdzanie sieci wodociągowych, wykonywanie zdjęć z powietrza czy rozbrajanie bomb.  
Te zadania wymagają operatora sterującego urządzeniem. Tego typu roboty nie są auto-  
nomiczne; ich czujniki dają operatorom zdalny dostęp do niebezpiecznych, odległych lub  
nieдоступnych miejsc. Niektóre z nich są częściowo autonomiczne i wykonują automa-  
tycznie zadania o mniejszej wadze. Autopilot drona stabilizuje lot, natomiast człowiek  
wyznacza jego trasę. Robot w wodociągu może poruszać się samodzielnie, a człowiek  
w tym czasie wyszukuje wzrokiem usterki do naprawy. W pełni **autonomiczne roboty  
mobilne** nie potrzebują operatora i podejmują samodzielnie decyzje, a także realizują  
zadania, takie jak transportowanie materiałów po nieznanym terenie (ściany i drzwi we-  
wnątrz budynków, samochody poruszające się po ulicach).

Pierwsze autonomiczne roboty mobilne zostały zaprojektowane z myślą o prostych  
środowiskach i były to np. roboty do czyszczenia basenów lub inteligentne kosiarki.  
Obecnie dużą popularnością cieszą się inteligentne odkurzacze, ponieważ można budo-  
wać roboty w rozsądnej cenie i są one w stanie poruszać się we wnętrzu domu wypełnio-  
nego przeszkodami.

Wiele autonomicznych robotów mobilnych zaprojektowano jako wsparcie dla za-  
wodowców pracujących w ściśle ustrukturyzowanych środowiskach, np. magazynowych.  
Interesującym przykładem jest robot pielęgnujący (rysunek 1.4). Środowisko polne jest czę-  
ściowo ustrukturyzowane, ale do rozpoznawania i pielenia chwastów potrzeba zaaw-  
ansowanego układu czujników. Nawet w ściśle ustrukturyzowanych środowiskach  
fabrycznych roboty dzielą obszar pracy z ludźmi, dlatego ich czujniki muszą wykazywać  
doskonałą niezawodność.



**Rysunek 1.4.** Autonomiczny robot mobilny do pielenia chwastów  
(dzięki uprzejmości firmy Ecorobotix)

Prawdopodobnie klasą autonomicznych robotów mobilnych mającą obecnie największy rozgłos są samochody autonomiczne. Proces ich konstruowania jest niezwykle trudny z powodu bardzo skomplikowanego, niepewnego środowiska ruchu ulicznego oraz rygorystycznych wymogów bezpieczeństwa.

Jeszcze bardziej skomplikowane i niebezpieczne środowisko stanowi przestrzeń kosmiczna. Łaziki marsjańskie Sojourner i Curiosity są półautonomicznymi robotami mobilnymi. Sojourner był aktywny przez trzy miesiące w 1997 r., z kolei Curiosity działa do teraz od momentu lądowania w 2012 r.! Ludzki operator steruje z Ziemi przebiegiem misji (wyznacza trasę oraz przeprowadzane eksperymenty), ale łaziki są zdolne do autonomicznego unikania zagrożeń.

Współcześnie proces badania i rozwoju w robotyce koncentruje się na zwiększaniu autonomii robotów poprzez udoskonalanie czujników oraz projektowanie inteligentniejszego sterowania robotem. Lepsze czujniki dostrzegają szczegóły coraz bardziej skomplikowanych sytuacji, żeby jednak móc sobie radzić z tymi sytuacjami, sterowanie zachowaniem robota musi być bardzo elastyczne i plastyczne. Szczególnie ważnym działem badań jest widzenie, ponieważ kamery są tanie, a przekazywane przez nie informacje bardzo szczegółowe. Podejmuje się starania w kierunku zwiększenia elastyczności układów robotycznych, dzięki czemu roboty byłyby w stanie uczyć się od człowieka lub dostosowywać się do nowych sytuacji. Innym aktywnie rozwijanym działem badań są oddziaływania pomiędzy człowiekiem a robotem. Wiąże się to z kwestiami czujników i inteligencji, ale także brana jest pod uwagę psychologia i socjologia oddziaływań.

## 1.4. Roboty humanoidalne

Literatura fantastyczno-naukowa i środki masowego przekazu lubią przedstawiać roboty o humanoidalnym kształcie. Wszyscy znamy R2-D2 i 3-CPO, robotycznych bohaterów z serii filmów *Gwiezdne wojny*, pojęcie to jednak sięga znacznie wcześniejszych czasów. W XVIII w. grupa szwajcarskich zegarmistrzów (Pierre i Henri-Louis Jaquet-Droz oraz Jean-Frédéric Leschet) zbudowali humanoidalny automat, aby zademonstrować swoje umiejętności mechaniczne i rozreklamować produkowane zegarki. Wiele współczesnych firm tworzy roboty humanoidalne z podobnych pobudek.

Roboty humanoidalne stanowią odmianę autonomicznych robotów mobilnych o skrajnie skomplikowanej konstrukcji mechanicznej umożliwiającej poruszanie ramionami i przemieszczanie się na nogach. Służą one do badań nad mechaniką chodu oraz oddziaływaniami na linii człowiek – maszyna. Jednymi z potencjalnych zastosowań robotów humanoidalnych są usługiwanie oraz trzymanie porządku w domu lub na stacji kosmicznej. Rozważa się używanie robotów do opieki nad osobami starszymi, które mogą czuć niepokój w obecności maszyny nieprzypominającej człowieka. Z drugiej strony roboty przypominające do złudzenia człowieka mogą budzić odragę; jest to zjawisko znane jako **dolina niesamowitości**.

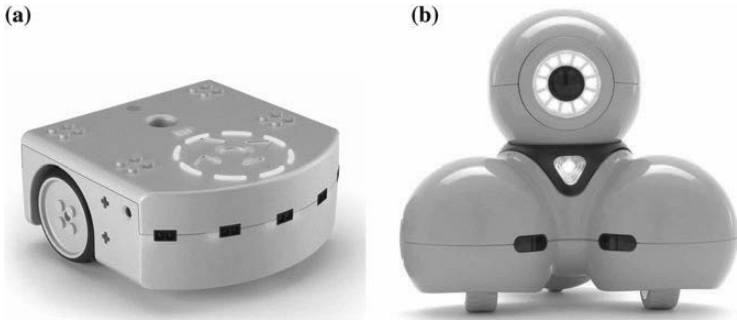
Roboty humanoidalne są bardzo trudne do konstruowania i sterowania. Z powodu występowania licznych wielokierunkowych połączeń ruchomych koszt ich produkcji jest bardzo wysoki. W większości zastosowań preferowane są roboty poruszające się na kołach lub po szynach, ponieważ są prostsze, tańsze i bardziej wytrzymałe.

## 1.5. Roboty edukacyjne

Postępy w elektronice i mechanice umożliwiły konstruowanie względnie tanich robotów. Roboty edukacyjne są często wykorzystywane w szkołach, zarówno na lekcjach, jak i na zajęciach pozalekcyjnych. Z powodu znacznej liczby poszczególnych rodzajów robotów edukacyjnych niemożliwy jest ich pełen przegląd. Poniżej prezentujemy kilka reprezentatywnych przykładów wykorzystywanych do edukacji.

### Gotowe roboty mobilne

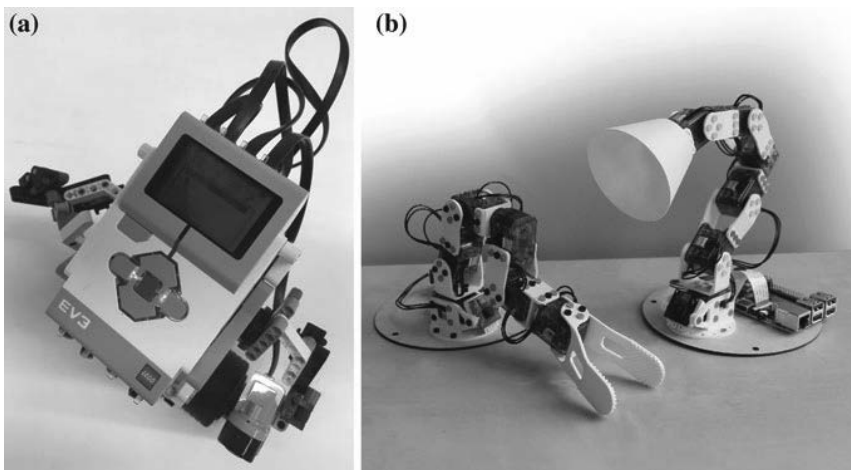
Wiele robotów edukacyjnych jest dostarczanych jako gotowe, niewymagające składania roboty mobilne. Na rysunku 1.5 (a) widzimy robota Thymio z firmy Mobsya, natomiast rysunek 1.5 (b) ukazuje robota Dash stworzonego w firmie Wonder Workshop. Te roboty są względnie tanie, odporne i zawierają mnóstwo czujników oraz elementów dodatkowych, takich jak światła. Ważną zaletą tych robotów jest możliwość implementowania algorytmów praktycznie po rozpakowaniu robota, bez konieczności poświęcania wielu godzin na projektowanie i konstruowanie maszyny. Takich gotowych robotów nie da się jednak modyfikować, chociaż wiele z nich pozwala na korzystanie z elementów budulcowych, np. klocków LEGO®.



**Rysunek 1.5.** (a) Robot Thymio. Źródło: <http://wiki.thymio.org/zh:mediakit> za zgodą École Polytechnique Fédérale de Lausanne i École Cantonale d'Art de Lausanne. (b) Robot Dash. Źródło: <https://www.makewonder.com/media-resources/> za zgodą firmy Wonder Workshop

## Zestawy robotyczne

Zestawy robotyczne LEGO® Mindstorms (rysunek 1.6 (a)) pojawiły się na rynku w 1998 r.<sup>1</sup>. Zestaw ten składa się ze standardowych klocków LEGO® i innych składników, a także silniczków, czujników i programowalnego klocka zawierającego komputer sterujący podzespołami robota. Zaletą zestawów robotycznych jest ich elastyczność: możesz projektować i budować robota z myślą o określonym zadaniu; ogranicza Cię wyłącznie wyobraźnia. Zestaw robotyczny może również służyć do wyjaśniania uczniom zasad projektowania urządzeń mechanicznych. Z kolei ich wadą jest wyższa cena w porównaniu z gotowymi robotami mobilnymi, a stosowanie algorytmów zależy od skutecznej implementacji odpornego projektu.



**Rysunek 1.6.** (a) Zestaw LEGO® Mindstorms EV3 (dzięki uprzejmości Adiego Shoraka, Intelitek). (b) Ramiona robota Poppy Ergo Jr (dzięki uprzejmości Poppy Project)

<sup>1</sup> Na rysunku zaprezentowano najnowszą wersję EV3 wypuszczoną na rynek w 2014 r.

Nowym trendem jest zastępowanie zbioru klocków elementami drukowanymi za pomocą drukarek 3D. Przykładem jest ramię robota Poppy Ergo Jr (rysunek 1.6 (b)). Korzystanie z wydrukowanych trójwymiarowych części zwiększa elastyczność konstruowania struktury mechanicznej i zwiększa odporność, wymaga jednak dostępu do drukarki 3D.

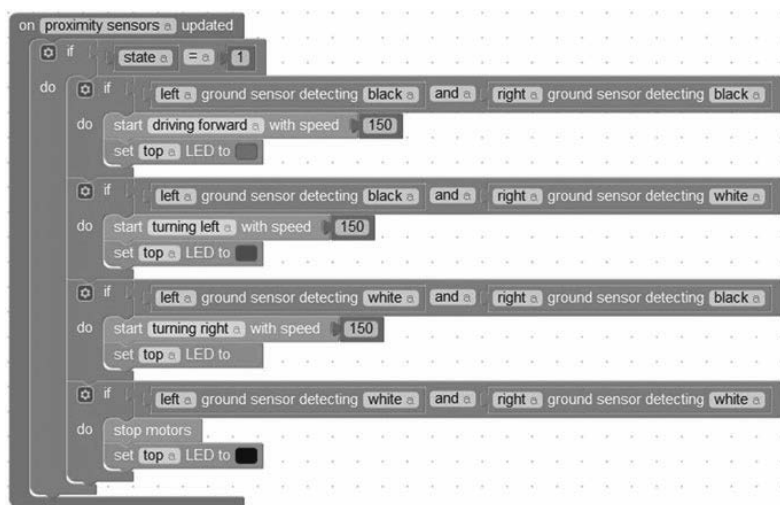
## Ramiona robota

Aby móc oddziaływać na środowisko, robot musi być wyposażony w **element wykonawczy (aktuator)**. Wiele robotów, zwłaszcza przemysłowych ramion robotycznych, używa **efektorów końcowych**, zazwyczaj chwytaków lub podobnych narzędzi do oddziaływania na środowisko (rysunki 1.3, 14.1 i 15.5(b)). Aktuatorami robotów mobilnych są silniki umożliwiające ruch robota, a także takie podzespoły, jak pompa próżniowa odkurzacza.

Roboty edukacyjne są zazwyczaj robotami mobilnymi, których jedynymi elementami wykonawczymi są silniki i urządzenia komunikacyjne, np. światła, głośniki lub wyświetlacz. Efektory końcowe można zbudować z zestawów robotycznych albo wykorzystać dodatkowe elementy gotowych robotów mobilnych, chociaż istnieją również edukacyjne ramiona robota (rysunek 1.6 (b)). Manipulowanie obiektami oznacza dodatkowy poziom złożoności w projektowaniu konstrukcji; jednakże algorytmy wykorzystujące efektory końcowe przypominają algorytmy przeznaczone dla prostych robotów mobilnych, w większości czynności opisywanych w tej książce będziemy zakładać jedynie, że Twój robot dysponuje silnikami i urządzeniami komunikacyjnymi.

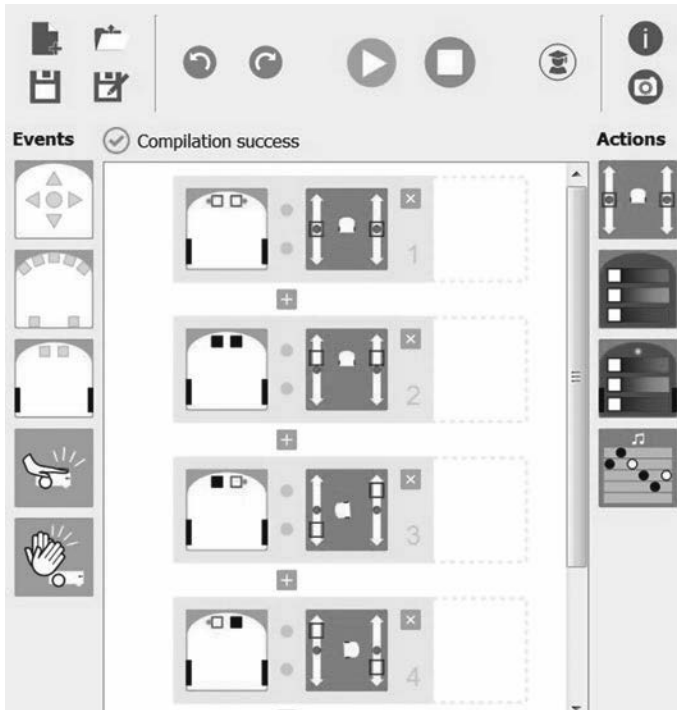
## Środowisko programistyczne

Każdy system robota edukacyjnego zawiera **środowisko programistyczne**. Językiem programowania może być jakaś odmiana standardowego języka, np. Javy lub Pythona. Proces programowania jest uproszczony, jeżeli zostaje użyty język blokowy, zazwyczaj bazujący na języku Scratch lub Blockly (rysunek 1.7).



Rysunek 1.7. Oprogramowanie Blockly robota Thymio

Aby jeszcze bardziej ułatwić programowanie młodym uczniom, można skorzystać z pełnej notacji graficznej. Na rysunku 1.8 widzimy graficzne środowisko programistyczne VPL (ang. *Visual Programming Language* — wizualny język programowania) przeznaczone dla robota Thymio. Wykorzystywane są w nim pary zdarzenie – czynność: gdy wystąpi wydarzenie symbolizowane za pomocą lewego bloku, wykonywane są działania zdefiniowane w kolejnych blokach.



Rysunek 1.8. Oprogramowanie VPL robota Thymio

Rysunek 1.9 przedstawia graficzne środowisko programistyczne robota Dash. Tutaj również wykorzystywane są zdarzenia i działania; działania są symbolizowane za pomocą węzłów, a zdarzenia oznaczane są strzałkami łączącymi węzły.

## 1.6. Robot ogólny

W tym podrozdziale prezentujemy opis robota ogólnego służącego w dalszej części książki do omawiania algorytmów robotycznych. Funkcjonalność tego robota jest zbliżona do robotów edukacyjnych, ale używany przez Ciebie robot może nie dysponować wszystkimi opisywanymi tu funkcjami, dlatego być może będziesz musiał improwizować od czasu do czasu. Być może nie zrozumiesz od razu niektórych wyjaśnianych poniżej pojęć, należy jednak sformalizować specyfikację techniczną tego robota. Szczegółowe informacje będą podawane w pozostałych rozdziałach.

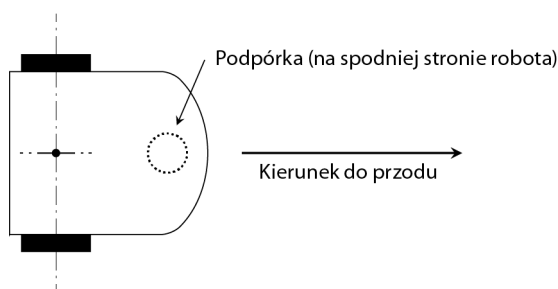


Rysunek 1.9. Oprogramowanie Wonder robota Dash.

Źródło: <https://www.makewonder.com/media-resources/> za zgodą firmy Wonder Workshop

### 1.6.1. Napęd różnicowy

Robot jest małym, autonomicznym pojazdem zawierającym **napęd różnicowy**, co oznacza, że porusza się on na dwóch kółkach wyposażonych w osobne, niezależne silniczki (rysunek 1.10). Aby robot się poruszał, należy wyznaczyć moc silnika w zakresie pomiędzy  $-100$  (pełna moc wstecz) przez  $0$  (zatrzymanie) aż do  $100$  (cała naprzód). Nie ma ustalonego związku pomiędzy mocą silnika a prędkością robota. Silnik może być podłączony do kół za pomocą różnych przełożeń, rodzaj opon wpływa na przyczepność, a po podłożu piaszczystym lub błotnistym mogą się one ślizgać.



Rysunek 1.10. Robot z napędem różnicowym

Na rysunku 1.10 widzimy rzut z góry naszego robota. Przód robota jest tu symbolizowany jako zakrzywiona linia po prawej stronie; jest to jednocześnie kierunek ruchu naprzód. Koła (czarne prostokąty) znajdują się z tyłu, na prawym i lewym boku korpusu robota. Kropka wskazuje punkt dokładnie na środku wału łączącego koła. Gdy robot skręca, obraca się wokół osi pionowej do tego punktu. Dla zachowania stabilności w przedniej części robota umieszczono podpórkę lub nienapędzane koło.

### Rysunek techniczny

Linia przerywana stanowi w inżynierii mechanicznej standardową notację **osi symetrii** jakiegoś podzespołu, np. koła. W przypadku rzutu z boku koła punkt przecięcia dwóch osi symetrii oznacza oś obrotu prostopadłą do płaszczyzny rzutu. W celu zwiększenia czytelności rysunków upraszczamy notację i zaznaczamy linią przerywaną jedynie **oś obrotu** podzespołu, np. koła. Dodatkowo punkt przecięcia oznaczający oś prostopadłą zazwyczaj jest symbolizowany za pomocą krzyżyka umieszczonego w kole lub jego wale.

Napęd różnicowy ma kilka mocnych punktów: jest prosty, ponieważ zawiera tylko dwa silniki bez dodatkowych podzespołów odpowiedzialnych za sterowanie, a także umożliwia robotowi obracanie się w miejscu. W samochodzie dwa koła są napędzane jednocześnie (lub cztery koła są napędzane w parach) i występuje w nim osobny, skomplikowany mechanizm sterowania zwany **systemem kompensacji Ackermanna**. Samochód nie może skręcać w miejscu, dlatego kierowcy muszą wykonywać wieloetapowe manewry, takie jak parkowanie równoległe; ich nauka nie sprawia ludziom większego problemu, ale są one bardzo trudne dla układu autonomicznego. Robot autonomiczny musi wykonywać poszczególne manewry, robiąc bardzo proste ruchy, dlatego preferowaną konfiguracją jest tu napęd różnicowy: w taki sposób bardzo łatwo jest obrócić się w dowolnym kierunku, a następnie poruszać się w tę stronę.

Podstawową wadę napędu różnicowego stanowi konieczność wprowadzenia trzeciego punktu styku z podłożem; w samochodzie od razu występują cztery koła stanowiące jego podpory, przez co łatwiej jest mu poruszać się po trudnym terenie. Kolejną wadą jest niemożność poruszania się w bok bez skręcania. Istnieją pewne konfiguracje umożliwiające ruch robota w bok (podrozdział 5.12), ale są one skomplikowane i kosztowne. Napęd różnicowy jest wykorzystywany również w pojazdach gąsienicowych, np. w maszynach do robót ziemnych czy czołgach. Te pojazdy mogą się poruszać po skrajnie nieprzyjnym terenie, gąsienice jednak wykazują się olbrzymim tarciem, dlatego ruch jest powolny i niezbyt precyzyjny.

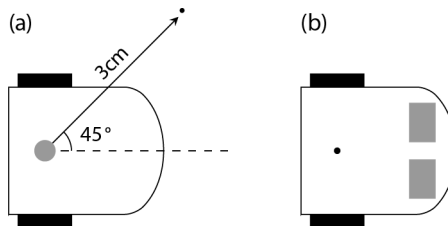
### Ustawianie mocy lub ustawianie szybkości

Mocą wytwarzaną przez silnik sterujemy za pomocą **przepustnicy**, którą może być np. pedał gazu w samochodzie albo dźwignia w samolocie lub na łodzi. Silniki elektryczne robotów mobilnych są sterowane poprzez modyfikowanie przyłożonego napięcia w ramach techniki zwanej **modulacją szerokości impulsów**. W wielu robotach edukacyjnych wykorzystywane są do tego algorytmy sterujące przypominające omówione w rozdziale 6., które sprawiają, że silniki wirują z określoną **szybkością docelową**. Nas interesują pojęcia i algorytmy związane z projektowaniem robotów, dlatego będziemy prezentować algorytmy w kontekście zasilania i osobno zajmować się sterowaniem szybkością.

#### 1.6.2. Czujniki zbliżeniowe

Nasz robot zawiera **horyzontalne czujniki zbliżeniowe** wykrywające obiekty w jego pobliżu. Istnieje wiele technologii służących do konstruowania takich czujników, np. podczerwona, laserowa czy ultradźwiękowa; robot ogólny symbolizuje roboty wykorzystujące

dowolne z tych rozwiązań. Przyjmujemy, że omawiane czujniki mają następujące właściwości: horyzontalny czujnik zbliżeniowy mierzy odległość (w centymetrach) od robota do obiektu i kąt (w stopniach) pomiędzy przodem robota a tym obiektem. Na rysunku 1.11 (a) widzimy obiekt znajdujący się 3 cm od środka robota pod kątem  $45^\circ$  w stosunku do kierunku, w jakim robot jest obrócony<sup>2</sup>.



**Rysunek 1.11.** (a) Robot z obrotowym czujnikiem (szara kropka). (b) Robot z dwoma czujnikami podłoża umieszczonymi na spodzie robota (szare prostokąty)

W praktyce robot edukacyjny będzie zawierał małą liczbę czujników, dlatego może nie wykrywać obiektów we wszystkich kierunkach. Ponadto tanie czujniki nie będą w stanie wykrywać odległych obiektów, a ich pomiary nie będą dokładne. Pomiary są również zniekształcane przez takie czynniki środowiskowe, jak typ obiektu, oświetlenie itd. W celu uproszczenia algorytmów nie będziemy uwzględniać ogólnych ograniczeń, gdy jednak będziesz implementować algorytmy, musisz brać te ograniczenia pod uwagę.

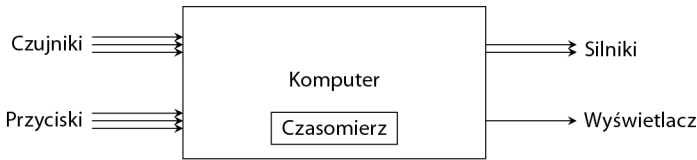
### 1.6.3. Czujniki podłoża

**Czujniki podłoża** są montowane na spodzie robota. Znajdują się one bardzo blisko podłoża, dlatego nie muszą mierzyć odległości ani kąta; zamiast tego czujnik mierzy jasność światła odbitego od podłoża za pomocą wartości w zakresie od 0 (całkowicie ciemno) do 100 (całkowicie jasno). Robot ogólny zawiera dwa czujniki podłoża umieszczone w przedniej części korpusu (rysunek 1.11 (b)), chociaż czasami wprowadzamy algorytmy wykorzystujące tylko jeden czujnik. Na rysunku 1.11 widzimy rzut z góry, chociaż czujniki podłoża znajdują się na *spodniej* stronie robota.

### 1.6.4. Wbudowany komputer

Nasz robot jest wyposażony we **wbudowany komputer** (rysunek 1.12). Jego dokładna specyfikacja nie jest istotna, ale przyjmujemy, że zawiera pewne funkcje. Może on odczytywać wartości czujników i wyznaczać moc silników. Istnieje możliwość wyświetlania informacji na małym ekranie lub za pomocą kolorowych lampek. Można wprowadzać sygnały i dane do komputera przy użyciu przycisków, klawiatury lub pilota.

<sup>2</sup> W dodatku A wyjaśniamy konwencje mierzenia kątów.



Rysunek 1.12. Wbudowany komputer

Dane są wprowadzane do komputera za pomocą **zdarzeń**, takich jak wciśnięcie przycisku. Wystąpienie zdarzenia powoduje uruchomienie **procedury obsługi zdarzeń**. Zdarzenie może zostać wykryte przez część sprzętową robota, co wiąże się z pojęciem **przerwania** (ang. *interrupt*), lub za pomocą oprogramowania, zazwyczaj za pomocą **odpytywania** (ang. *polling*) polegającego na cyklicznym oczekiwaniu na zdarzenia przez system operacyjny w odgórnie ustalonych przedziałach czasowych. Po zakończeniu działania procedury obsługi zdarzeń są wznowiane wcześniejsze obliczenia.

Procedury obsługi zdarzeń różnią się od programów sekwencyjnych zawierających początkową instrukcję do wprowadzania danych i końcową instrukcję do wyświetlania wyników, ponieważ są uruchamiane w odpowiedzi na nieprzewidziane zdarzenia. Obsługa zdarzeń służy do implementowania interfejsu graficznego na komputerze lub w smartfonie: po kliknięciu lub dotknięciu ikony zostaje uruchomiona procedura obsługi zdarzeń. W przypadku robota zdarzeniem może być sygnał dyskretny, np. wciśnięcie przycisku. Zdarzenia mogą występować także wtedy, gdy wartość ciągła (np. odczytywana przez czujnik) przekroczy jakiś odgórnie ustalony **próg**.

Komputer zawiera **czasomierz** działaniem przypominający stoper w smartfonie. Jest to zmienna zawierająca **wyznaczony** okres, np. 0,5 s, symbolizowany za pomocą stałoprecyzyjnej liczby milisekund lub mikrosekund (0,5 s to 500 ms). Zegar sprzętowy komputera wywołuje przerwania w stałych przedziałach czasowych, a system operacyjny zmniejsza wartość czasomierza. Gdy ta wartość będzie równa 0, to czasomierz **wygasa** i następuje przerwanie.

Czasomierze służą do implementowania powtarzalnych zdarzeń, takich jak migotanie lampki. Służą także do **odpytywania**, czyli rozwiązania alternatywnego do procedury obsługi zdarzeń: w tym przypadku nie jest obliczany moment wystąpienia zdarzenia, lecz wartości czujników są okresowo odczytywane i zapisywane. Mówiąc dokładniej: odpytywanie odgrywa rolę procedurę obsługi zdarzeń w chwili wygaśnięcia czasomierza, ale konstrukcja oprogramowania wykorzystującego to rozwiązanie może się znacznie różnić od struktury oprogramowania bazującego na zdarzeniach.

## 1.7. Formalizm algorytmiczny

Algorytmy implementowane jako programy komputerowe są używane przez wbudowany komputer do sterowania działaniem robota. Nie korzystamy tu z żadnego konkretnego języka programowania; prezentujemy tu algorytmy w formie **pseudokodu**, czyli ustrukturyzowanego formatu składającego się z kombinacji języka naturalnego, matematyki i struktur programistycznych. Algorytm 1.1 jest prostą strukturą służącą do mnożenia liczb całkowitych za pomocą sukcesywnego sumowania wartości. Danymi wejściowymi algorytmu jest para liczb całkowitych (typu `int`), natomiast dane wyjściowe to

iloczyn dwóch wartości wejściowych. Deklarujemy w algorytmie trzy zmienne stałoprzecinkowe  $x$ ,  $a$  i  $b$ . W części wykonawczej widzimy pięć instrukcji. Do oznaczenia zakresu pętli stosujemy wcięcia (podobnie jak w Pythonie). Operację przypisania symbolizujemy za pomocą strzałki, dzięki czemu możemy wykorzystać znajome symbole  $=$  i  $\neq$  do oznaczania, odpowiednio, równości i nierówności we wzorach matematycznych<sup>3</sup>.

| <b>Algorytm 1.1. Mnożenie liczb całkowitych</b>                                                                     |                                                                                                                            |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <pre>integer x ← 0 integer a, b</pre>                                                                               |                                                                                                                            |
| <pre>1. a ← input an integer 2. b ← input a non-negative integer 3. while b ≠ 0 4.   x ← x + a 5.   b ← b - 1</pre> | <pre>// Wprowadza wartość typu int // Wprowadza nieujemną wartość typu int  // Dodaje wartość a do x // Dla każdej b</pre> |

Moc silnika jest definiowana za pomocą instrukcji przypisania:

```
left-motor-power ← 50           // Moc lewego silnika
right-motor-power ← -50        // Moc prawego silnika
```

Zdefiniowaliśmy czujniki zbliżeniowe jako zwracające odległość do wykrytego obiektu i kąt względem przodu robota, jednak często łatwiej jest korzystać z wyrażeń zapisanych w języku naturalnym, np.:

```
when object detected in front    // Kiedy wykryto obiekt z przodu
when object not detected in back // Kiedy nie wykryto obiektu z tyłu
```

## 1.8. Przegląd treści książki

Pierwszych sześć rozdziałów poświęciliśmy podstawowym pojęciom i algorytmom z zakresu robotyki.

Rozdział 1. „Roboty i ich zastosowania”. W tym rozdziale omawiamy i klasyfikujemy rodzaje robotów. Definiujemy tu także robota ogólnego oraz formalizujemy notację używaną do przedstawiania algorytmów w dalszej części książki.

Rozdział 2. „Czujniki”. Roboty są czymś więcej niż zdalnie sterowanymi urządzeniami, jak np. telewizor. Wykazują autonomiczne działanie na podstawie wykrywania obiektów w środowisku za pomocą czujników. W tym rozdziale zajmiemy się czujnikami wykorzystywanymi przez roboty i wyjaśnimy pojęcia zakresu, rozdzielczości, precyzji oraz dokładności. Przyjrzymy się także kwestii nieliniowości czujników i jej rozwiązaniom.

Rozdział 3. „Zachowanie reaktywne”. Gdy autonomiczny robot wykrywa obiekt w środowisku, reaguje zmianą zachowania. W tym rozdziale przyjrzymy się algorytmom, dzięki którym robot bezpośrednio zmienia swoje działanie na podstawie danych z czujników.

<sup>3</sup> Wiele języków programowania wykorzystuje znak  $=$  jako symbol przypisania, a znaki  $==$  jako równość i  $!=$  jako nierówność. Jest to dezorientujące, ponieważ równość  $x = y$  jest symetryczna, ale przypisanie  $x = x + 1$  już nie. Wolimy zachować notację matematyczną.

Pojazdy Braitenberga stanowią prosty, ale elegancki przykład zachowania reaktywnego. Zaprezentujemy tu kilka wariantów algorytmu podążania za linią.

Rozdział 4. „Maszyny stanów skończonych”. Robot może się znajdować w różnych stanach; jego reakcja na dane z czujników zależy nie tylko od ich wartości, lecz także od bieżącego stanu. Maszyny stanów skończonych stanowią sposób opisywania stanów, a także przejść pomiędzy stanami, uzależnionych od występowania zdarzeń.

Rozdział 5. „Ruch robota i odometria”. Roboty autonomiczne badają środowisko za pomocą działań. Niemal codziennie słysząc jakieś nowiny o doświadczeniach z inteligentnymi samochodami. W tym rozdziale zajmiemy się pojęciami dotyczącymi ruchu (droga, czas, prędkość, przyspieszenie), a następnie przejdziemy do odometrii, podstawowej metody wykorzystywanej przez roboty do przemieszczenia się z miejsca na miejsce. Odometria wiąże się z błędami o dużej istotności, których naturę trzeba zrozumieć.

W drugiej części tego rozdziału omówimy zaawansowane pojęcia z zakresu ruchu robotycznego: kodery (enkodery) kół, układy nawigacji inercyjnej poprawiające dokładność odometrii, a także stopnie swobody oraz holonomiczność wpływające na planowanie ruchu robota.

Rozdział 6. „Sterowanie”. Robot autonomiczny jest układem sterowania w pętli zamkniętej, ponieważ dane z czujników wpływają na jego zachowanie, które z kolei wpływa na sposób wykonywania pomiarów przez czujniki. Na przykład autonomiczny samochód podjeżdżający do sygnalizacji świetlnej może mocniej hamować w miarę zbliżania się do światła. W tym rozdziale poznamy aparat matematyczny układów sterowania gwarantujących optymalne zachowanie: samochód zatrzymuje się w końcu na światłach, a proces hamowania przebiega stopniowo i płynnie.

Autonomiczny robot mobilny musi w jakiś sposób poruszać się od położenia początkowego do miejsca docelowego, aby np. przynieść lekarstwa z apteki w szpitalu do pacjenta. Nawigacja stanowi fundamentalny, trudny do rozwiązania problem w robotyce. Cztery następne rozdziały przedstawiają algorytmy nawigacyjne w różnych kontekstach.

Rozdział 7. „Nawigacja lokalna: omijanie przeszkód”. Podstawowym wymogiem związanym z robotem mobilnym jest niewjeżdżanie w ściany, ludzi lub inne przeszkody. Jest to nawigacja **lokalna**, ponieważ dotyczy bezpośredniego otoczenia robota i nie wiąże się w żaden sposób z celami, jakie robot ma do zrealizowania. Rozdział rozpoczniemy od algorytmów poruszania się wzdłuż ściany pozwalających robotowi na omijanie przeszkód; są one podobne do algorytmów poruszania się w labiryncie. Został tu także opisany algorytm probabilistyczny symulujący poruszanie się kolonii mrówek poszukujących źródła pożywienia.

Rozdział 8. „Lokalizacja”. Dawno temu, zanim każdy smartfon był wyposażony w moduł GPS, określaliśmy swoje położenie, korzystając z papierowej mapy. Lokalizacja jest trudnym problemem: czy potrafisz określić swoją bieżącą pozycję na mapie? Roboty mobilne mają do rozwiązania taki sam problem, często bez pomocy wzroku. Ten rozdział omawia lokalizację za pomocą obliczeń trygonometrycznych ze znanych pozycji. Chwilę później poświęcimy uwagę lokalizacji probabilistycznej: robot może wykryć jakiś charakterystyczny punkt, ale podobnych punktów na mapie może być więcej. Dzięki przypisywaniu prawdopodobieństw i ich aktualizowaniu w miarę poruszania się w środowisku robot może w końcu określić swoje położenie z dość dużą dozą pewności.

Rozdział 9. „Budowanie map”. Skąd jednak wziąć mapę? Dokładne mapy miast są powszechnie dostępne, jednak autonomiczny odkurzacz nie kupi sobie mapy Twojego

mieszkania. Robot podwodny służy do badania nieznanego środowiska. Aby robot mógł wykonać operację lokalizacji, potrzebuje mapy, jednak w celu utworzenia mapy nieznanego środowiska robot musi być w stanie lokalizować siebie w takim sensie, że musi wiedzieć, jak dużą pokonał odległość pomiędzy dwoma punktami w środowisku. Rozwiązaniem okazuje się równoczesne lokalizowanie i budowanie mapy. W pierwszej części rozdziału opisujemy algorytm badania środowiska w celu określenia pozycji poszczególnych przeszkód. Następnie prezentujemy uproszczony algorytm jednoczesnego lokalizowania oraz budowania mapy.

Rozdział 10. „Nawigacja na podstawie map”. Założmy, że skoro robot już dysponuje mapą, przydzielono mu zadanie wymagające przemieszczenia się z pozycji początkowej do miejsca docelowego. Jaką trasę powinien obrać? Ten rozdział zawiera dwa algorytmy planowania ścieżki: klasyczny algorytm Dijkstry wyszukujący najkrótszą drogę w grafie, a także algorytm A\* będący wydajniejszą wersją algorytmu Dijkstry wykorzystującą informacje heurystyczne.

W dalszych rozdziałach poruszamy zaawansowane zagadnienia z dziedziny robotyki. Te treści są wzajemnie niezależne, możesz więc je czytać w dowolnej kolejności.

Rozdział 11. „Sterowanie za pomocą logiki rozmytej”. Algorytmy sterowania (rozdział 6.) wymagają precyzyjnego określenia wartości docelowej: układ grzewczy musi znać temperaturę docelową pomieszczenia, a tempomatowi należy wyznaczyć szybkość docelową samochodu. W alternatywnym rozwiązaniu znanym jako logika rozmyta wykorzystywane są ogólne parametry, takie jak zimno, chłodno, ciepło, gorąco albo bardzo powoli, powoli, szybko, bardzo szybko. W tym rozdziale opisujemy logikę rozmytą, a także wyjaśniamy, jak można ją wykorzystać do sterowania robotem zbliżającym się do obiektu.

Rozdział 12. „Przetwarzanie obrazów”. Większość czujników robotycznych mierzy odległości i kąty za pomocą laserów, dźwięku lub podczerwieni. Człowiek z kolei polega głównie na zmyśle wzroku. Dobrej jakości aparaty cyfrowe są tanie i dostępne w każdym smartfonie. Problem stanowi to, co nasze mózgi wykonują w ułamku sekundy: przetwarzanie i interpretowanie obrazów uchwyconych za pomocą aparatu. Przetwarzanie obrazów cyfrowych stanowi przedmiot intensywnych badań, a zaprojektowane w jego ramach algorytmy są wykorzystywane w zaawansowanych robotach mających wystarczająco dużą moc obliczeniową. W tym rozdziale przedstawiamy algorytmy przetwarzania obrazów i udowadniamy, że robot edukacyjny może je wykorzystywać nawet bez podłączonej kamery.

Rozdział 13. „Sieci neuronowe”. Roboty autonomiczne w bardzo skomplikowanych środowiskach nie mogą zawierać algorytmów dostosowanych do każdej możliwej sytuacji. Autonomiczny samochód nie jest w stanie przewidzieć, na jakie modele pojazdów i zdarzenia drogowe natrafi w trakcie jazdy. Roboty autonomiczne muszą się uczyć z doświadczeń; jest to podstawowe zagadnienie z dziedziny sztucznej inteligencji, które bada się już od wielu lat. W tym rozdziale przyjrzymy się jednej ze strategii uczenia: sztucznym sieciom neuronowym zaprojektowanym na podobieństwo naszych komórek mózgowych. Sieć neuronowa wykorzystuje algorytmy uczące do modyfikowania wewnętrznych parametrów, dzięki czemu robot może stale dostosowywać się do nowych sytuacji.

Rozdział 14. „Uczenie maszynowe”. Inną strategią uczenia jest technika statystyczna zwana uczeniem maszynowym. W tym rozdziale opisujemy dwa algorytmy służące do rozróżniania dwóch różnych klas, np. światła czerwonego i zielonego w sygnalizacji świetlnej. Pierwszy algorytm, liniowa analiza dyskryminacyjna, bazuje na średnich i wariancjach zestawu prób. W drugim algorytmie są wykorzystywane perceptrony, czyli odmiana sieci

neuronowej zdolna do rozróżniania dwóch klas nawet wtedy, gdy próby nie spełniają założeń statystycznych wymaganych przez liniową analizę dyskryminacyjną.

Rozdział 15. „Robotyka roju”. Jeżeli chcesz poprawić skuteczność układu, nieraz łatwiej jest wykorzystać wiele wystąpień danego elementu, zamiast próbować usprawnić pojedynczy element. Weźmy np. pod uwagę problem badania jakiegoś obszaru ze względu na zanieczyszczenie. Możesz użyć jednego bardzo szybkiego (i drogiego) robota, ale łatwiej jest wypuścić wiele robotów mierzących skażenie na małym obszarze. Jest to tzw. robotyka roju poprzez analogię z rojem owadów zdolnych do określania najlepszej trasy pomiędzy gniazdem a źródłem pożywienia. Podstawowym problemem w robotyce roju, podobnie jak we wszystkich układach współbieżnych, jest opracowanie metod koordynowania i komunikacji pomiędzy robotami. W tym rozdziale opisaliśmy dwie takie techniki: wymianę informacji oraz oddziaływania fizyczne.

Rozdział 16. „Kinematyka manipulatora robotycznego”. Roboty edukacyjne są małymi robotami mobilnymi poruszającymi się po dwuwymiarowej powierzchni. Istnieją roboty mobilne poruszające się w trzech wymiarach: powietrzne i podwodne. Aparat matematyczny i algorytmy ruchu trójwymiarowego zostały opracowane na potrzeby innego kluczowego działu robotyki: manipulatorów stosowanych powszechnie w wytwórstwie. W tym rozdziale zajmiemy się uproszczoną analizą podstawowych pojęć z zakresu manipulatorów robotycznych (kinematyka prosta i odwrotna, obroty, przekształcenia jednorodne) w dwóch wymiarach, a także jako przedsmak obrotów trójwymiarowych.

Na końcu książki umieściliśmy dwa dodatki.

Dodatek A. „Jednostki miary”. Ten dodatek zawiera tabelę A.1 przechowującą jednostki miary. Tabela A.2 zawiera z kolei przedrostki łączone ze wspomnianymi jednostkami.

Dodatek B. „Powtórka z matematyki”. Znajdziesz tu wyjaśnienia wielu pojęć matematycznych stosowanych w niniejszej książce. Ponadto umieściliśmy tu także szczegółowe wprowadzenia twierdzeń po to, aby nie odciągać czytelnika od właściwej treści książki.

## 1.9. Podsumowanie

Roboty są wszędzie: w fabrykach, domach, szpitalach, a nawet w przestrzeni kosmicznej. Znaczna część działalności badawczo-rozwojowej poświęcona jest konstruowaniu robotów oddziałujących bezpośrednio z ludźmi. Roboty są używane w szkołach jako motywacja do zdobywania wiedzy technicznej (metodologia STEM), a także jako narzędzie pedagogiczne służące do przekazywania tej wiedzy w danym środowisku. Celem tej książki jest wykorzystywanie robotów edukacyjnych w procesie poznawania algorytmów robotycznych oraz działania tych urządzeń.

Większość robotów edukacyjnych ma zbliżoną konstrukcję: są to małe roboty mobilne wykorzystujące napęd różnicowy i czujniki zbliżeniowe. W celu uniezależnienia treści od konkretnej platformy zdefiniowaliśmy robota ogólnego mającego wszystkie te własności. Opisywane w tej książce algorytmy powinny być łatwe do zaimplementowania w robocie edukacyjnym, chociaż poszczególne typy robotów mają odmienną skuteczność w kontekście czujników i silników. Algorytmy są prezentowane za pomocą pseudokodu, którego przetłumaczenie na dowolny obsługiwany przez Twojego robota język graficzny lub tekstowy nie powinno stanowić dużego wyzwania.

## 1.10. Literatura uzupełniająca

Nietechniczny opis robotów z naciskiem na roboty wzorowane na przyrodzie oraz humanoidalne znajdziesz w: Winfield [8].

Międzynarodowa Komisja Normalizacyjna (ang. *International Organization for Standardization* — ISO<sup>4</sup>) publikuje standardy dotyczące robotów. Na oficjalnej stronie komisji, <https://www.iso.org/home.html>, znajdziesz katalog robotyki (ISO/TC 299), a także formalne definicje pojęć robotycznych: *ISO 8373:2012 Robots and robotic devices — Vocabulary* i *ISO 19649:2017 Mobile robots — Vocabulary*.

Zagadnienia poruszane w tej książce są opisane bardziej szczegółowo w zaawansowanych podręcznikach robotyki, takich jak [3, 6]. Ich początkowe rozdziały omawiają wiele przykładowych robotów.

Roboty edukacyjne są dostarczane wraz z dokumentacją ich możliwości i środowiskiem programistycznym. Dostępne są także podręczniki poświęcone poszczególnym typom robotów, np. [7] omawia zestawy robotyczne LEGO® Mindstorms, a [4] zajmuje się opisem wykorzystywania Pythona do programowania robotów Scribbler. Język VPL został omówiony w [5].

Pseudokod jest często używany w podręcznikach poświęconych strukturom danych i algorytmom, począwszy od klasycznej pozycji [1]. Używany przez nas styl zaczerpnęliśmy z [2].

## Bibliografia

1. Aho A.V., Hopcroft J.E., Ullman J.D., *Projektowanie i analiza algorytmów*, Helion, Gliwice (2003).
2. Ben-Ari M., *Podstawy programowania współbieżnego i rozproszonego*. Wydanie drugie, WNT, Warszawa (2016).
3. Dudek G., Jenkin M., *Computational Principles of Mobile Robotics*, 2nd edn., Cambridge University Press, UK (2010).
4. Kumar D., *Learning Computing with Robots*. Lulu (2011), do pobrania na stronie [https://cs.brynmawr.edu/~dkumar/Myro/PDFs/ComputingWRobots\(June08\).pdf](https://cs.brynmawr.edu/~dkumar/Myro/PDFs/ComputingWRobots(June08).pdf).
5. Shin J., Siegwart R., Magnenat S., *Visual programming language for Thymio II robot*, w: „Proc. of the 2014 Conference on Interaction Design and Children (IDC)” (2014).
6. Siegwart R., Nourbakhsh I.R., Scaramuzza D., *Introduction to Autonomous Mobile Robots*, 2nd edn., MIT Press, USA (2011).
7. Trobaugh J.J., Lowe M., *Skuteczne programowanie Lego Mindstorms*, Promise, Warszawa (2013).
8. Winfield A., *Robotics: A Very Short Introduction*, Oxford University Press, USA (2012).

---

<sup>4</sup> To nie jest pomyłka! ISO jest oficjalną, skróconą nazwą organizacji, a nie jej akronimem w żadnym z jej trzech oficjalnych języków: angielskim, francuskim i rosyjskim.

# PROGRAM PARTNERSKI

— GRUPY HELION —

- 
1. ZAREJESTRUJ SIĘ
  2. PREZENTUJ KSIĄŻKI
  3. ZBIERAJ PROWIZJĘ

Zmień swoją stronę WWW w działający bankomat!

**Dowiedz się więcej i dołącz już dzisiaj!**

<http://program-partnerski.helion.pl>

GRUPA  
**Helion** 

**Robotyka** jest bardzo ciekawą dziedziną inżynierii o ogromnym znaczeniu praktycznym. Wymaga znajomości kilku dyscyplin wiedzy, takich jak algorytmika, matematyka czy mechanika. Równocześnie roboty oddziałują na wyobraźnię i są przedmiotem zainteresowania uczniów na każdym poziomie edukacji, od przedszkolnego po uniwersytecki. O ile jednak początkowe zapoznanie się z robotami polega głównie na zabawie i eksperymentach, o tyle poważniejsze studiowanie robotyki oznacza konieczność przyswojenia złożonych zagadnień, takich jak algorytmy robotyczne.

W tej książce gruntownie wyjaśniono reguły robotyki, pokazano także, w jaki sposób przechodzi się od teoretycznych algorytmów do działania rzeczywistego robota. Znajdziemy tutaj przegląd różnego rodzaju robotów, jak również tworzących je podzespołów, jednak najważniejszą częścią publikacji jest omówienie algorytmów robotycznych — od odometrii i sterowania ze sprzężeniem zwrotnym po przetwarzanie obrazów i uczenie maszynowe. Poszczególne algorytmy zostały przedstawione za pomocą pseudokodu, co pozwoli na ich implementację w różnych językach programowania. Mogą zostać użyte w większości robotów edukacyjnych wyposażonych w dwusilnikowy napęd różnicowy, czujniki zbliżeniowe i moduł wyświetlania wyników użytkownikowi. Zawarty tu materiał pozwoli się dobrze przygotować do zaawansowanych studiów robotyki.

## W książce między innymi:

- roboty i ich zastosowanie
- czujniki i zachowanie reaktywne robota
- ruch robota i sterowanie nim
- nawigacja robota mobilnego: omijanie przeszkód i wykorzystywanie map
- zastosowanie sieci neuronowych i uczenia maszynowego w robotach
- robotyka roju i kinematyka manipulatora robotycznego

## Algorytmy robotyczne: zrozum i zaimplementuj!

**Mordechai Ben-Ari** jest profesorem informatyki w Instytucie Naukowym Weizmanna w Rechowot. Przyczynił się do rozwoju języka programowania Ada. Napisał kilka podręczników dla studentów, bardzo popularnych w krajach anglosaskich.

**Francesco Mondada** jest profesorem Politechniki Federalnej w Lozannie. Zajmuje się sztuczną inteligencją i robotyką. Współtworzył kilka robotów edukacyjnych, takich jak Khepera, S-bot, e-puck czy Thymio.

**Helion** 



helion.pl



**HELION SA**  
ul. Kościuszki 1c  
44-100 Gliwice  
tel.: 32 230 98 63  
helion@helion.pl

*Sprawdź nasze szkolenia!*



AKADEMIA IT & BUSINESS

HELIONSZKOLENIA.PL

**KOD KORZYŚCI**  
*Sięgnij po więcej!* ▶



ISBN 978-83-283-8823-9



**INFORMATYKA W NAJLEPSZYM WYDANIU**

Cena: 69,00 zł