

Tendencje rozwoju mobilnych robotów lądowych (3)

Autonomia robotów mobilnych – stan obecny i perspektywy rozwoju

Maciej Trojnecki
Piotr Szynkarczyk

Praca stanowi trzecią część publikacji „Tendencje rozwoju mobilnych robotów lądowych”. W pierwszej części dokonano przeglądu współczesnych konstrukcji robotów mobilnych w kontekście zastosowań specjalnych. W drugiej – opisano nowe tendencje w robotyce mobilnej związane głównie z robotami rzucanymi. W niniejszej pracy skupiono uwagę na stanie wiedzy i aktualnych tendencjach w dziedzinie autonomii robotów mobilnych. Omówiono potrzeby i możliwości dalszego jej rozwoju.

Autonomia robotów mobilnych

Podstawą autonomicznego przemieszczania się każdego robota mobilnego w wybranym otoczeniu jest umiejętność prowadzenia nawigacji za pomocą wbudowanych systemów percepcji i lokomocji. Zagadnienie nawigacji z omijaniem przeszkód jest jednym z najbardziej istotnych problemów robotyki. Nawigacja robotem wymaga ciągłego podejmowania decyzji, co ma zapewnić osiągnięcie zadanych stanów przejściowych oraz stanu docelowego. Zagadnienia nawigacji stanowią domenę sztucznej inteligencji, gdy nawigacja realizowana jest przez nadrzędne poziomy układu sterowania. W sterowaniu odruchowym są realizowane różne elementarne zadania zachowania się robota mobilnego takie, jak: „osiągnij środek wolnej przestrzeni”, „idź do celu”, „podążaj przy ścianie” oraz koordynacja tych zachowań.

Koordynacja elementarnych zachowań robota mobilnego jest realizowana na wyższym poziomie hierarchicznego układu sterowania. Przy koordynacji zachowań często pojawia się problem polegający na tym, że kilka zadań pozostaje ze sobą w konflikcie. Wówczas nadrzędny układ sterowania musi wypracować sterowanie w taki sposób, aby tylko jedno z zachowań zostało realizowane albo wystąpiło pośrednie zachowanie robota.

W systemach nawigacyjnych robotów mobilnych w procesie planowania bezkolizyjnej trasy najczęściej jest stosowana jedna z trzech metod: histogramów kątowych, potencjałów oraz rozchodzenia się fali.

Idealnym narzędziem w procesie planowania trasy są sieci komórkowe (CNN), które mogą być realizowane za pomocą układów elektronicznych, umożliwiając stworzenie takiego algorytmu planowania trasy, który ma

zalety metody potencjałowej, tj. możliwość uwzględniania zakresu oddziaływania przeszkód na robota i jednocześnie nie ma minimów lokalnych.

Metody sztucznych pól potencjalnych były rozwijane przez wielu badaczy i weryfikowane przede wszystkim w zadaniach omijania przeszkód przez autonomiczne roboty mobilne. Idea tej metody polega na tym, że robot może być np. „przyciągany” do celu i „odpychany” od przeszkód. Umożliwia to realizację zadania typu: „idź do celu z ominięciem przeszkód”. Wykorzystując tę metodę i informacje dostępne z czujników, można także realizować zadania typu: „podążaj za źródłem światła”, „uciekaj od źródła światła”, „podążaj za innym robotem” itd.

Można wyróżnić dwa podejścia w metodach sztucznych pól potencjalnych. W metodzie klasycznej uwzględnia się pozycję, a w jej uogólnieniu również prędkość mobilnego robota.

Proste, indywidualne zachowania robotów mobilnych są często realizowane z zastosowaniem rozmytych systemów wnioskujących. Logika rozmyta może być używana również do opisu problematyki niepewności modelowania spowodowanej niepełną lub zakłóconą informacją o systemie, środowisku i obiekcie.

W układach autonomicznej nawigacji znalazły zastosowanie także sztuczne sieci neuronowe. Generowanie trajektorii, zdeterminowane warunkami zewnętrznymi, można uzyskać z neuronowego układu sterowania opierając się m.in. na idei algorytmu Braitenberga. Teoria budowy sterowników robotów mobilnych wg idei Braitenberga ma silne podstawy biologiczne. Zbudowane przez niego roboty mobilne obrazują obecne tendencje do tworzenia prostych sterowników, wykazujących złożone zachowania dzięki interakcji z otoczeniem.

W układzie sterowania neuronowego, oprócz generowania zbioru elementarnych zachowań, można realizować również ich połączenie (koordynację zachowań) z wykorzystaniem sieci neuronowych typu WTA (zwykłyca bierze wszystko). Złożone zachowa-

dr inż. Maciej Trojnecki,
dr inż. Piotr Szynkarczyk
– Przemysłowy Instytut Automatyki i Pomiarów

nie „iść do celu z ominięciem przeszkód” można zrealizować przez połączenie elementarnych zachowań „iść do celu” i np. „podążaj przy ścianie” lub „osiągnij środek wolnej przestrzeni”. Realizację zachowania „iść do celu z ominięciem przeszkód”, czyli połączenie dwu lub więcej elementarnych zachowań, można realizować wykorzystując ideę działania sieci neuronowych typu WTA, gdzie jako kryterium przyjmuje się minimum prędkości.

Rozwój zastosowań robotów i tworzenie układów sterowania autonomicznego stworzyły także zapotrzebowanie na systemy sterowania generujące trajektorie w czasie rzeczywistym, z czym wiąże się konieczność spełnienia dodatkowych wymagań dotyczących rozpoznawania stanu otoczenia i szybkości działania systemu sterującego.

Oprócz robotów autonomicznych, szczególną rolę odgrywają roboty przeznaczone do poruszania się po podłożu w systemie teleoperacji. Układy zdalnego sterowania takich robotów możemy podzielić na dwie grupy: układy kierowane i nadążne. Najpowszechniej stosowanymi systemami sterowania w systemach nadążnych są w tym przypadku systemy oparte na układach nawigacji satelitarnej (GPS) oraz układy wizyjne. Zastosowanie odbiorników GPS w systemach nadążnych pozwala np. na zwiększenie odległości między przewodnikiem a podążającym za nim pojazdem do wartości ograniczonej zasięgiem dwukierunkowego łącza radiowego i nie wymaga utrzymywania kontaktu wzrokowego. Trasa przewodnika wyznaczona przez jego odbiornik GPS jest przesyłana drogą radiową do podążającego za nim pojazdu. Drugim najczęściej stosowanym rozwiązaniem nadążnych systemów kierowania jest zastosowanie układów wizyjnych. Za pomocą kamer wizyjnych można również, przez stereoskopowe nałożenie obrazów, uzyskać ocenę odległości od przeszkody.

Niezależnie od tego, w jaki sposób jest realizowany układ zdalnego sterowania czy nawigacji robota mobilnego, jego zadaniem jest ostatecznie wygenerowanie trajektorii ruchu robota mobilnego, która stanowi trajektorię zadaną realizowaną przez układ sterowania niższego poziomu.

Kluczowe problemy badawcze i tendencje dalszego rozwoju robotów mobilnych

Analizując komercyjnie dostępne konstrukcje robotów mobilnych należy stwierdzić, że są one stosunkowo przestarzałe technologicznie i nie zawierają elementów autonomii. Generalnie obserwuje się taki stan rynku, w którym – mimo postępu nauki – nie są dostępne konstrukcje robotów inspekcyjnych lub interwencyjnych o zwiększonej autonomii. Należy podkreślić, że w tym zakresie nie ma polskich, a nawet europejskich opracowań, które mogłyby być zintegrowane w kompleksowym, mobilnym systemie wspomagającym akcje antyterrorystyczne.

Zazwyczaj elementy składowe systemu sterowania są wzajemnie powiązane, lecz większość dotychczasowych prac nad ich rozwojem prowadzona była niezależnie. Przeprowadzona analiza tych rozwiązań wykazała, że jedynie kompleksowy rozwój układów systemu sterowania, ze szczególnym uwzględnieniem ich wzajemnych powiązań i zależności, umożliwi opracowanie efektywnego systemu sterowania autonomicznego. Analiza środowisk zaangażowanych w opracowywanie robotów mobilnych uwiadamia istniejące różnice między: ofertą producentów, propozycją placówek badawczych a oczekiwaniami użytkowników. Występujące różnice między oczekiwaniami użytkowników a ofertą przemysłu są spowodowane zarówno brakiem ściśle

Pokaz robotów mobilnych

W dniu 30 lipca br. na terenie Przemysłowego Instytutu Automatyki i Pomiarów - PIAP odbył się pokaz robotów mobilnych, opracowanych i wykonanych w Instytucie (fot. 2). Zostały zaprezentowane możliwości jezdne i operacyjne robotów: Inspector (fot. 3), Expert (fot. 3), Scout (fot. 3, 4), nowego robota IBIS (fot. 3, 5) oraz prototypu lekkiego robota miotanego LRB (fot. 1). Pokazy obserwowali przedstawiciele Ministerstwa Gospodarki, Biura Operacji Antyterrorystycznych Komendy Głównej Policji, Straży Granicznej, Szefostwa Wojsk Inżynieryjnych Wojsk Lądowych, Szefostwa Inżynierii Wojskowej - Sztabu Generalnego WP, Biura Analiz Rynku Uzbrojenia MON, Departamentu Zaopatrywania Sił Zbrojnych MON, Straży Pożarnej - Jednostki Ratowniczo-Gaśniczej nr 6 w Warszawie, Ambasady Amerykańskiej w Polsce, firmy Lockheed Martin, firmy Astra Sp. z o.o. oraz czasopisma branżowego Raport-WTO. Obok zamieszczono kilka zdjęć z pokazu.

Anna Łacic, PIAP
fot. PIAP



zdefiniowanych (przez użytkowników) zadań dla pojazdów bezzałogowych, jak i oferowaniem (przez przemysł) pojazdów bez uwzględniania potrzeb i wymagań użytkowników. Natomiast różnice między przemysłem a placówkami naukowymi wynikają z braku pełnej znajomości poziomu rozwoju naukowego wśród przedstawicieli przemysłu oraz trudności z wdrożeniem przez przemysł nowatorskich rozwiązań naukowych.

Pomimo dużego zainteresowania (w licznych pracach na ten temat) problemem lokalizacji i planowania trasy autonomicznych robotów mobilnych, można powiedzieć, że:

- brakuje zastosowania najnowszych czujników sygnałów nawigacyjnych oraz algorytmów filtracji i integracji sygnałów, pozwalających na estymowanie najlepszej informacji o pozycji w bezwzględny układzie współrzędnych
- systemy prezentowane szczegółowo są systemami eksperymentalnymi, zaś dokładne rozwiązania stosowane we wdrożonych robotach autonomicznych nie są publikowane
- pierwsze powstałe systemy tworzenia map trójwymiarowych otoczenia wskazują, że istnieje konieczność dalszych prac nad algorytmami rozpoznawania i identyfikacji obrazów trójwymiarowych w celu zwiększenia ich efektywności, a także pod kątem obniżenia kosztów stosowanych czujników
- wadą autonomicznych systemów mobilnych są częste kłopoty z komunikacją, co może utrudnić wspólne wysiłki w walce z przestępczością i terroryzmem na poziomie krajowym i europejskim
- ważną kwestią jest wymóg zgodności systemów z obowiązującymi regulacjami prawnymi i innymi wytycznymi takimi, jak np.: ochrona danych, ingerencja w systemy wykrywania
- akcesoria do robotów, zwłaszcza w przypadku zastosowań specjalnych, nie mają ustandaryzowanych

interfejsów elektrycznych, elektronicznych, mechanicznych i w dziedzinie oprogramowania – z tego powodu adaptacja dowolnego akcesorium, np. czujnika skażeń chemicznych, jest za każdym razem nowym zadaniem projektowo-badawczym.

Jednym z ważniejszych zadań robotyki mobilnej jest rozwijanie systemów nawigacyjnych, które zwykle zawierają trzy podstawowe moduły: budowa reprezentacji środowiska, lokalizacja i planowanie działań.

Typowym zagadnieniem robotyki mobilnej jest generowanie trasy do zadanego punktu i dotarcie do celu w możliwie krótkim czasie. Inne zadania to: przeszukiwanie pomieszczenia, rozpoznanie środowiska, wyszukanie zadanego obiektu, skoordynowanie pracy grupy robotów. W praktycznych zastosowaniach robotów mobilnych, pojazd, oprócz planowania i realizowania trasy, powinien wykonać także szereg innych zadań np. inspekcyjnych. Warto więc stworzyć system planowania trasy, który mógłby być realizowany sprzętowo i nie obciążać robota.

Realizowanie zadań zachowania się robota mobilnego, takich jak: „osiągnij środek wolnej przestrzeni”, „idź do celu”, „podażaj przy ścianie” oraz koordynacji tych zachowań wymaga zastosowania metod sztucznej inteligencji. Pomimo znacznego postępu w opracowaniu algorytmów planowania i realizacji ruchu, które mogą być wykonywane w czasie rzeczywistym, istnieje kilka zagadnień, które wymagają dalszych badań. Należą do nich m.in.: planowanie aktywnej percepcji, tzn. planowanie ruchu robota mobilnego w połączeniu z działaniem sensorów i ich wykorzystanie w sterowaniu odruchowym, realizacja przez niższy poziom sterowania zaplanowanego ruchu z uwzględnieniem dynamiki robota mobilnego oraz przede wszystkim koordynacja zachowań realizujących proste podzadania robota mobilnego w sterowaniu behawioralnym.



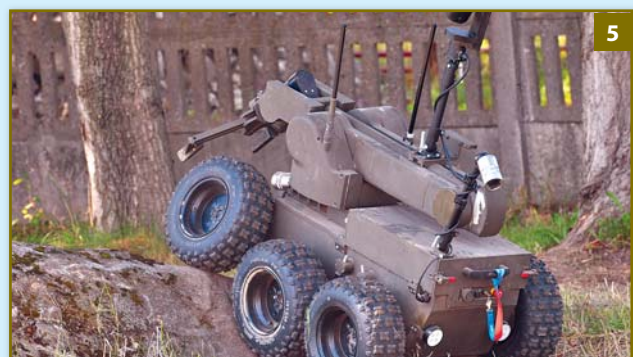
2



4



3



5

Problem lokalizacji i planowania drogi robota mobilnego jest jednym z najistotniejszych problemów w badaniach nad robotami autonomicznymi. Trwają prace nad znalezieniem uniwersalnego rozwiązania, które pozwoliłoby na dokładną lokalizację robota, planowanie wariantów jego drogi oraz podejmowanie decyzji o wyborze drogi optymalnej. W dotychczasowych pracach badawczych były opracowane systemy podejmowania decyzji w warunkach niepewności. Część z nich można zastosować do robotów mobilnych, jednakże proponowane rozwiązania nie wyszły poza fazę eksperymentalną.

Z problematyką autonomii robotów mobilnych wiąże się systemy wizji komputerowej. Rozróżnia się trzy zasadnicze rodzaje złożoności środowisk pracy takich systemów stosowanych w autonomicznej nawigacji: środowiska wewnętrzne (np. korytarze i pomieszczenia w budynkach), strukturyzowane środowisko zewnętrzne (np. jazda po autostradzie) i nieznane, pozabawione struktury środowiska zewnętrzne.

O ile istnieją już rozwiązania nawigacji wizyjnej dla środowisk pierwszego i drugiego rodzaju, pracujące z dużym sukcesem (korzystające z metod filtracji Bayesa rozkładu wiarygodnego stanu względnie śledzenia toru drogi), o tyle rozwiązania dla środowisk trzeciego rodzaju znane są jedynie w astronautyce (np. Mars Pathfinder). Rozwiązania opisywane w literaturze dotyczą zazwyczaj systemów jeszcze niewdrożonych, które nie wyszły poza fazy eksperymentalne. Z kolei instytucje, które są producentami wdrożonych robotów autonomicznych, zazwyczaj nie publikują szczegółowych informacji na temat zastosowanych w nich algorytmów nawigacyjno-decyzyjnych.

Metody rozpoznawania obrazów są przedmiotem badań od wielu lat. Istnieją już wdrożone i efektywnie działające systemy, które pozwalają na identyfikację obiektów na podstawie obrazu. W ostatnich latach coraz częściej prowadzone są badania nad systemami, które, na podstawie informacji z kamer lub różnego rodzaju czujników, pozwalają na stworzenie cyfrowej trójwymiarowej mapy otoczenia. Powstały systemy komercyjne oparte na zastosowaniu skanerów laserowych, co powoduje, że przy wysokiej dokładności są stosunkowo drogie. Pomimo wysokich cen znajdują zastosowanie w geodezji, archeologii, zaś ostatnio także w wykrywaniu awarii. Systemy prostsze oparte na zastosowaniu tzw. stereowizji, detektorów paskowych lub na ruchomych kamerach, znajdują zastosowanie w autonomicznych robotach mobilnych.

Obiecujące wydaje się także zastosowanie w robotach mobilnych termowizji do ominięcia przeszkód niemożliwych do wykrycia przez inne sensory takich, jak zbiorniki wodne, płomienie czy leżący ranni ludzie, którzy mogą być potraktowani jako niska przeszkoda i w konsekwencji przejechani przez robota.

Podkreślić należy także, że w pracach dotyczących nawigacji robotów mobilnych w układzie bezwzględny (np. geograficzny) są stosowane proste czujniki sygnałów nawigacyjnych. W tym przypadku algorytmy integrujące sygnały oparte są na filtrze Kalmana.

Brakuje systemów, które łączyłyby w sobie zastosowanie najnowszych osiągnięć technicznych z dziedziny czujników nawigacyjnych – czujników bezwładnościowych w technologii MEMS i MOEMS oraz urządzeń GPS dostosowanych do odbioru sygnałów DGPS i EGNOS.

Stosowane algorytmy integracji sygnałów zazwyczaj wykorzystują klasyczny filtr Kalmana, zaś w literaturze nawigacyjnej można spotkać inne bardziej efektywne algorytmy (oparte na zastosowaniu innych filtrów adaptacyjnych, np. filtru Juliera-Uhlmana lub filtrów cząstkowych), których zastosowanie może gwarantować większą dokładność i stabilność.

Ważnym zadaniem w systemie sterowania jest zastosowanie niezawodnego algorytmu sterującego. Powinien on zapewniać wyznaczanie trasy bez względu na zewnętrzne warunki atmosferyczne, przy różnorodnym stopniu zacielenia przewodnika i trasy. Równocześnie algorytm musi mieć zdolność wyznaczania trasy z szerokiej gamy scenarii otoczenia, z uwzględnieniem innych pojazdów, ludzi, drzew, budynków itp. Tworzenie systemów bezzałogowych, umożliwiających wykorzystanie wysoko zautomatyzowanych środków transportu, wymaga prowadzenia prac badawczych nad opracowaniem układów kierowania, lokalizowania oraz rozpoznania otoczenia. Wyniki badań wyznaczania odległości obiektów od kamery wskazują, że metoda ta może być wykorzystywana do lokalizowania pojazdów względem znaczników o znanych wymiarach oraz do sterowania jazdą pojazdu podążającego za przewodnikiem z zainstalowanym znacznikiem pasywnym (obiekt odbijający światło) lub aktywnym (obiekt emitujący światło).

Ważnym problemem badawczym w przypadku robotów lądowych jest zapewnienie odpowiednich właściwości jezdnych w zróżnicowanym terenie, dlatego celowe wydaje się poszukiwanie takich rozwiązań, które z jednej strony byłyby stosunkowo łatwe w realizacji (jak napęd kołowy), a z drugiej strony dawałyby możliwość dostosowania się układu jezdnego robota do nierówności terenu (jak w robotach krocących). Problem ten może być rozwiązany przez zastosowanie rozwiązań hybrydowych, tj. łączących cechy robotów kołowych i krocących.

W przypadku robotów mobilnych równie ważne zagadnienia to zminimalizowanie masy oraz zużycia energii. Celowe są badania dotyczące nowych, lekkich a zarazem wytrzymałych materiałów oraz lekkich i bardzo wydajnych akumulatorów. Obiecujące wydają się badania dotyczące ogniwi paliwowych, które w przyszłości mogą znaleźć szerokie zastosowanie w robotach mobilnych.

Reasumując, należy powiedzieć, że pomimo wielu dotychczas prowadzonych badań, złożoność problemów powoduje, iż dotąd nie opracowano uniwersalnych metod planowania i realizacji ruchu autonomicznych robotów mobilnych, rozpoznawania otoczenia oraz podejmowania decyzji na poziomie porównywalnym z poziomem podejmowania decyzji przez człowieka. Istnieje także potrzeba doskonalenia właściwości jezdnych robotów mobilnych, aby mogły poruszać się w bardziej zróżnicowanym środowisku.

Bibliografia

1. Andrzejczak M., Narkiewicz J.: *Applications of Julier-Uhlmann filter for processing signals from navigation sensors*, Zeszyty Naukowe WSM w Szczecinie, nr 70, Szczecin 2003.
2. Będkowski J., Masłowski A.: *Mobile robot ATRVJR application for risky scenario*, Pomiary Automatyka Robotyka 2/2008, dodatek na CD, 418–424.
3. Eghtesad M., Necsulescu D. S.: *Experimental study of the dynamic based feedback linearization of an autonomous wheeled ground vehicle*, Robotics and Autonomous Systems 47 (2004), 47–63.
4. Giergiel J., Hendzel Z., Żylski W., Trojnecki M.: *Zastosowanie metod sztucznej inteligencji w mechatronicznym projektowaniu mobilnych robotów kołowych*, Monografia, Wydawnictwo KRI DM AGH, Kraków, 2004, 327 str.
5. Gopalakrishnan B., Tirunellai S., Todkar R.: *Design and development of an autonomous mobile smart vehicle: a mechatronics application*, Mechatronics 14 (2004), 491–514.
6. Chen Haichu: *An autonomous miniature wheeled robot based on visual feedback control*, Front. Mech. Eng. China 2007, 2(2): 197–200.
7. Lowa E. M.P., Manchesterb I. R., Savkina A. V.: *A biologically inspired method for vision-based docking of wheeled mobile robots*, Robotics and Autonomous Systems 55 (2007) 769–784.
8. Yong-Kyun Na, Se-Young Oh: *Hybrid Control for Autonomous Mobile Robot Navigation Using Neural Network Based Behavior Modules and Environment Classification*, Autonomous Robots 15, 2003, 193–206.
9. Puchan D., Skrzypczyński P.: *Perspektywy wykorzystania robotów mobilnych w działaniach poszukiwawczych podczas katastrof budowlanych*, Pomiary Automatyka Robotyka 2/2008, dodatek na CD, 398–409.
10. Purwin O., D'Andrea R.: *Trajectory generation and control for four wheeled omnidirectional vehicles*, Robotics and Autonomous Systems 54 (2006), 13–22.
11. Racz J.: *Elementy sztucznej inteligencji w systemach nawigacyjnych autonomicznych mobilnych robotów*, praca doktorska, Instytut Podstawowych Problemów Techniki Polskiej Akademii Nauk, Warszawa 1995.
12. Shneier M., Chang T., Hong T., Shackleford W., Bostelman R., Albus J. S.: *Learning traversability models for autonomous mobile vehicles*, Auton Robot (2008) 24: 69–86.
13. Siemiątkowska B., Chojcecki R., Zając M.: *System nawigacyjny robota mobilnego Elektron*, Pomiary Automatyka Robotyka 2/2008, dodatek na CD, 380–388.
14. Szykarczyk P.: *Zastosowanie równoległej architektury warstwowej i problem wyboru akcji w sterowaniu systemów autonomicznych*, rozprawa doktorska, Wojskowa Akademia Techniczna, Warszawa 1999.
15. Szykarczyk P., Czupryniak R.: *Roboty mobilne i bezpieczeństwo*, Pomiary Automatyka Robotyka 2/2008, dodatek na CD, 441–450.
16. Trojnecki M.: *Sterowanie ruchem nadążnym mobilnego robota kołowego z zastosowaniem sieci neuronowych*, rozprawa doktorska, Politechnika Rzeszowska, Rzeszów 2003.
17. Typiak A.: *Bezzałogowe pojazdy lądowe w zastosowaniach militarnych*, Pomiary Automatyka Robotyka 2/2007, dodatek na CD (8 stron).
18. Typiak A.: *Zastosowanie kamery wizyjnej do wyznaczania położenia obiektów w otoczeniu pojazdu bezzałogowego*, Pomiary Automatyka Robotyka 2/2008, dodatek na CD, 459–464.
19. Ulatowski W., Masłowski A.: *Sterowanie i współpraca pojazdów AGV*, Pomiary Automatyka Robotyka 2/2007, dodatek na CD (10 stron).
20. Wołoszczuk A., Andrzejczak M., Szykarczyk P.: *Architecture of mobile robotics platform planned for intelligent robotic porter system – IRPS project*, Journal of Automation, Mobile Robotics & Intelligent Systems, Vol. 1, No. 3, September 2007.
21. Zielińska T.: *Maszyny kroczące*, PWN, Warszawa 2003. ■