
Wykorzystanie quasi-chaotycznych oscylatorów do generowania rytmu chodu robotów kroczących

Artur Gmerek¹

Streszczenie

Celem pracy było opracowanie systemu sterowania autonomicznych robotów kroczących, który byłby w stanie sprawnie kontrolować rytm chodu robotów, przy różnych właściwościach podłoża i warunkach otoczenia. Eksperymenty zostały przeprowadzone na modelach owadopodobnych robotów kroczących. Chody były generowane z użyciem oscylatorów sprzężonych (van der Pola i rekurencyjnych sieci neuronowych). Przeprowadzono również badania symulacyjne nad sterowaniem z kontrolowaną podatnością pedipulatorów. Korzystając z opracowanego systemu roboty były w stanie np. skutecznie wydostać się z zagłębienia terenu.

1. WSTĘP

Maszyna krocząca jest to urządzenie techniczne, które przemieszcza się przy pomocy odnóży lub kończyn [4]. Do podstawowych typów lokomocji należą chód i bieg. O pierwszych maszynach kroczących wspomina już mitologia grecka, w micie o bogu Hefajstosie, który próbował budować różne urządzenia przypominające zwierzęta.

Na przestrzeni wieków wynalazcy próbowali opracowywać różne maszyny kroczące, ale duże postępy w tej dziedzinie pojawiły się dopiero w XX wieku, po opracowaniu teorii sterowania silnikami elektrycznymi i rozwinięciu technologii mikroprocesorowych. W celu sprawnej kontroli robota kroczącego konieczny jest złożony system sterowania sterujący jednocześnie wieloma aktuatorami [2]. Krok milowy w obszarze projektowania robotów kroczących poczyniono w *Massachusetts Institute of Technology* (MIT), gdzie pracuje specjalny zespół zajmujący się już od kilkunastu lat tą dziedziną nauki. Opracowali oni między innymi takie roboty jak *Spring Turkey*, czy *Spring Flamingo* [10].

Sprawne kontrolowanie ruchu robotów kroczących nie zostało jeszcze do końca rozwiązane. Nie mniej jednak pojawienie się ostatnio tak zaawansowanych robotów, jak np. *BigDog*, skonstruowany przez przedsiębiorstwo *Boston Dynamics*, może świadczyć o tym, że dziedzina ta jest już bardzo rozwinięta [9]. Robot ten jest w stanie sprawnie poruszać się w nieznanym terenie

¹Politechnika Łódzka, Instytut Automatyki, artur.gmerek@p.lodz.pl

i posiada bardzo duże zdolności adaptacyjne (utrzymuje równowagę na lodzie i przy oddziaływaniu silnych sił zewnętrznych).

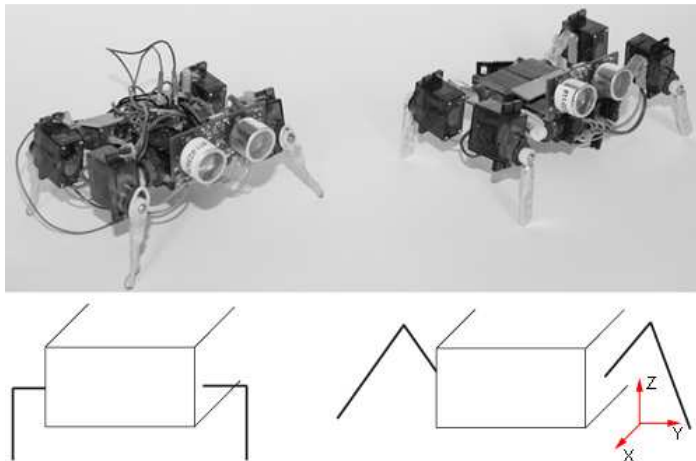
Praca przedstawiona w tym artykule dotyczy systemu sterowania robotów kroczących w nieznanym otoczeniu. Do generowania położeń pedipulatorów robotów zostały użyte oscylatory sprzężone van der Pola i rekurencyjne sztuczne sieci neuronowe (ARNN). Z badań innych naukowców wiadomo bowiem, że potrafią one dobrze odwzorować przemieszczenie kończyn zwierząt i prawidłowo opisują ruch w czasie zmian rytmu chodu [1, 6].

2. MODELE ROBOTÓW

Roboty zostały w ten sposób zaprojektowane, aby *oporność właściwa* (ϵ), zdefiniowana, jako miara energii (E) potrzebnej do przemieszczenia jednostki masy m wzdłuż drogi s była możliwie jak najmniejsza:

$$\epsilon = \frac{E}{mgs} \quad (1)$$

W pracy Zielińskiej [6] zostało udowodnione, że oporność właściwa jest funkcją wybranych parametrów maszyny kroczącej. Analizując wyprowadzony wzór można wysnuć wniosek, że maszyna krocząca będzie wydajna energetycznie, gdy masa nóg będzie możliwie mała, a postura robota będzie podobna do postury pająka (korpus nisko nad podłożem i nogi ugięte w kolanach) [6]. Modele robotów zostały stworzone w oparciu o powyższe spostrzeżenia. Struktura kinematyczna kończyn jednego robota jest wzorowana na gadach, natomiast drugiego na owadach (Rys. 1).

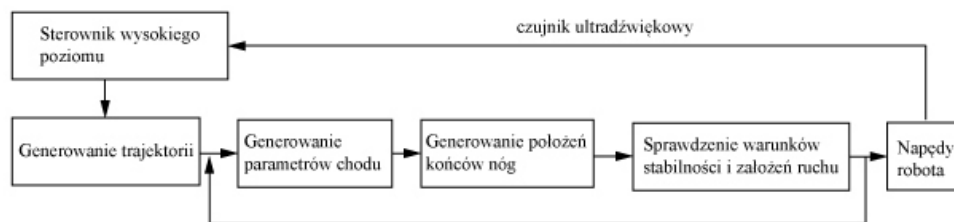


Rys. 1. Zdjęcie wykonanych robotów (górną) oraz struktura ich pedipulatorów (dół): *lewy* - wzorowana na gadach, *prawy* - wzorowana na owadach

Każdy z pedipulatorów zaprojektowanych robotów posiadał 2 stopnie swobody. Taki układ pozwalał na sprawne poruszanie się robotów (nie był jednak możliwy chód bokiem).

3. SYSTEM STEROWANIA

System sterowania rzeczywistych robotów kroczących składał się z kilku podprogramów pracujących na różnych poziomach abstrakcji (Rys. 2). Zasadnicze badania dotyczyły generatorów chodu i automatycznej zmiany ich parametrów. W zaproponowanym systemie punkty kolejnych stąpień były wyznaczane przez generatory chodu. W przypadku, gdy zostało stwierdzone ugrzęźnięcie, to punkty były wybierane w sposób quasi-losowy. Procedura ta polegała na tym, że wybrane parametry generatorów chodu były zmieniane w sposób losowy, a następnie po obliczeniu własności ruchu (położenie, prędkość, przyspieszenie), wyniki były sprawdzane pod kątem zachowania stabilnej postawy robota oraz utrzymania wcześniej wytyczonego kierunku. Wynik, który nie mieścił się w wyznaczonym tunelu błędów, był odrzucany, a proces obliczeń rozpoczynał się od nowa.



Rys. 2. Schemat systemu sterowania

3.1. Sprzężone oscylatory van der Pola

Jedną z metod używaną do generowania rytmu chodu robota było użycie 4 sprzężonych oscylatorów van der Pola (VDP). Jest to metoda, która jest stosunkowo często używana do sterowania robotów kroczących [3, 6]:

$$\ddot{x}_i - \alpha_i(p_i^2 - x_{ai}^2)\dot{x}_i + \omega_i^2 x_{ai} = q_i \quad (4)$$

Od parametrów oscylatorów zależą własności ruchu. Parametr α ma przede wszystkim wpływ na kształt fali, p - na amplitudę przebiegu, ω - na częstotliwość, natomiast q - na prędkość i amplitudę. Indeks i oznacza numer danego oscylatora. Szczegółowe związki między parametrami oscylatorów, a własnościami ruchu zostały przedstawione w pracy [6].

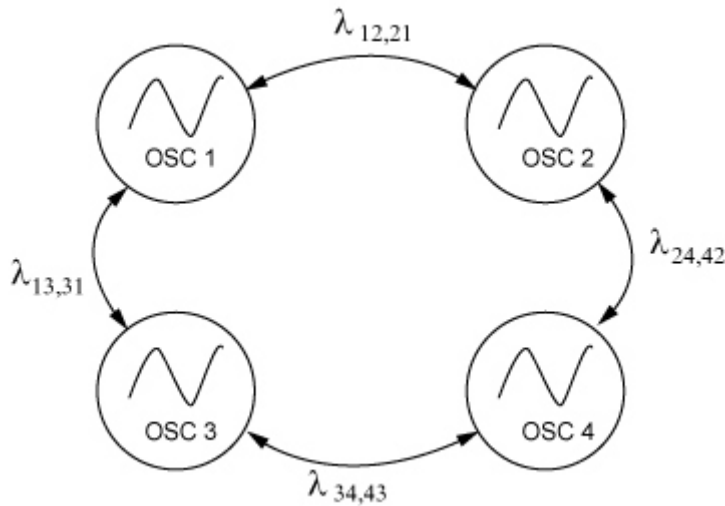
Roboty były sterowane przy pomocy metody *follow the leader*. Została ona zaimplementowana na tej zasadzie, iż wyjściowe parametry oscylatorów (położenie

i prędkość) były przepisywane do zmiennych złączowych przednich pedipulatorów. Tylnie pedipulatory były stawiane w ten sam sposób, co odpowiadające im przednie po ich stronie ciała. Jedynie wartości kątów oraz prędkości miały zmodyfikowane znaki i ruch oczywiście odbywał się w innych chwilach czasowych.

Sprzężenie pomiędzy oscylatorami zrealizowane było z wykorzystaniem równań liniowych:

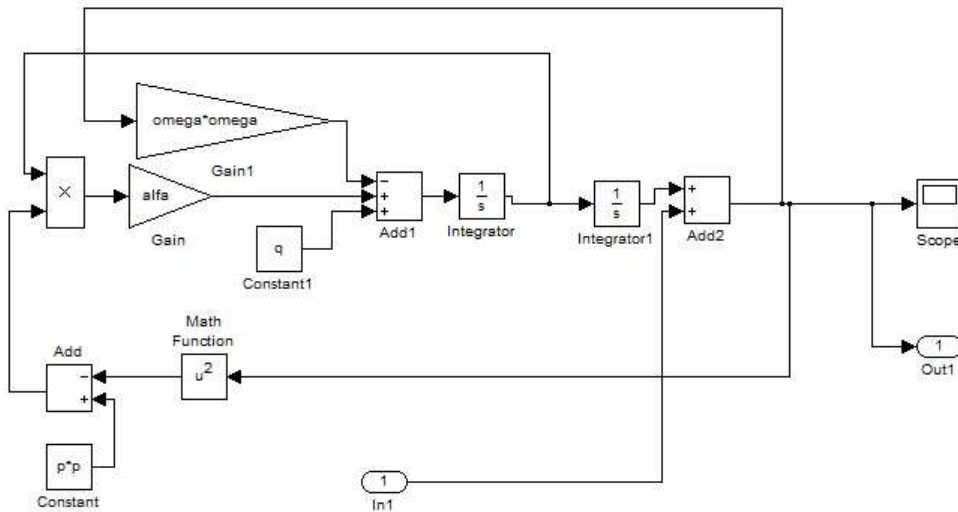
$$x_{ai} = x_j + \sum_j \lambda_{ij} x_j \quad (5)$$

Parametr λ określa, jakie są relacje poszczególnych oscylatorów w stosunku do siebie. Indeksy i oraz j oznaczają numery oscylatorów. Sprzężenie między oscylatorami zostało przedstawione na rysunku 3. Indeks **1 i 2** oznacza nogę lewą przednią, **3 i 4** – prawą przednią. Każdy oscylator sprzężony był z dwoma sąsiednimi. Równanie VDP jest nierozwiązywalne analitycznie. Do rozwiązywania używane było całkowanie numeryczne algorytmem Rungego-Kutty.



Rys. 3. Graficzna reprezentacja przyjętych sprzężeń pomiędzy oscylatorami VDP

Oscylatory VDP były symulowane w środowisku *Matlab Simulink* za pomocą schematu przedstawionego na Rys. 4.

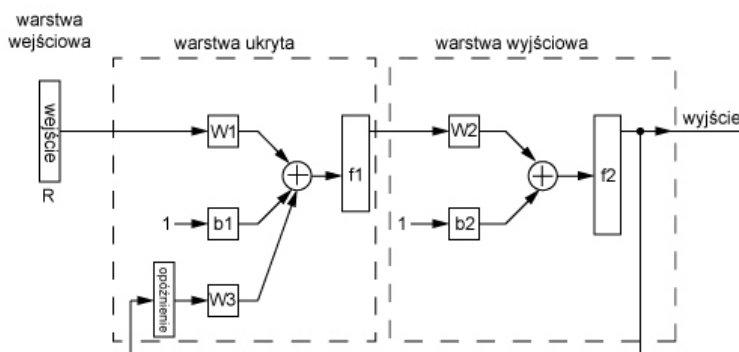


Rys. 4. Schemat użytych oscylatorów van der Pola w oprogramowaniu Matlab-Simulink

Zostały dobrane takie wartości parametrów oraz początkowe wartości kątów, które prawidłowo odwzorowywały zakładany wzorec ruchu. Wartości te zostały dobrane doświadczalnie. Przed zaimplementowaniem do robotów parametry były skalowane.

3.2. Sieć neuronowa

Innym rodzajem algorytmu chodu, który był badany, był generator oparty na rekurencyjnej sieci neuronowej (ARNN) (Rys. 6). Sztuczne sieci neuronowe są coraz częściej stosowane do kontrolowania ruchów maszyn koczających [5]. Są one w stanie szybko estymować kolejne parametry i dodatkowo charakteryzują się własnościami adaptacyjnymi.



Rys. 5. Struktura rekurencyjnej sieci neuronowej używanej do estymacji położenia poszczególnych odnóży

Wybrana sieć posiadała jedną warstwę ukrytą i jedną wyjściową. Funkcje przejścia w warstwach ukrytej i wyjściowej były funkcjami sigmoidalnymi:

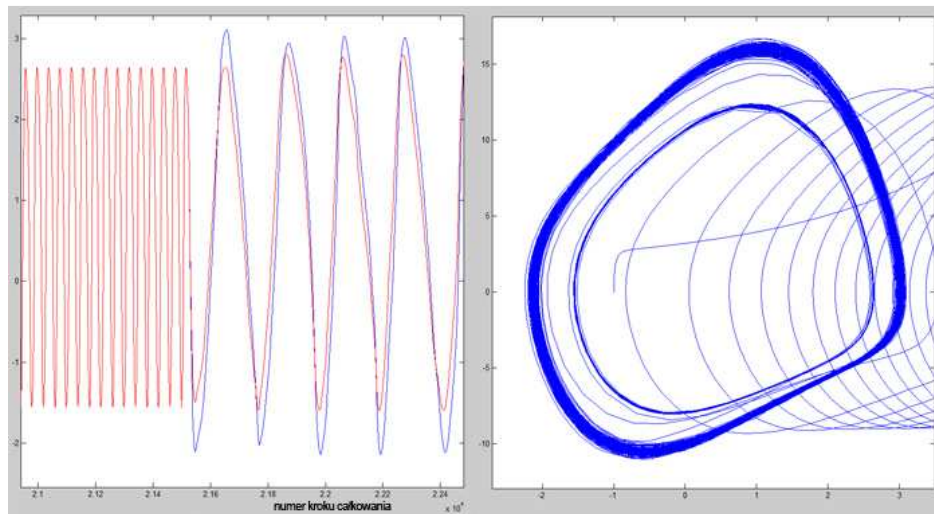
$$F = \frac{1}{1 + e^{-\beta x}} \quad (6)$$

W warstwie ukrytej znajdowało się 6 neuronów. Sieć posiadała 4 wyjścia, których wartości były przekazywane w następnym kroku na wejścia sieci. Sieć była uczona z wykorzystaniem różnych wzorców, ale jednym z tych, na którym zostały przeprowadzone główne eksperymenty był chód trójpodporowy. Nauczona sieć neuronowa była inicjalizowana poprzez wprowadzenie na jej wejścia wartości początkowych kątów. Poza tym na sieć były również podawane, w trakcie jej pracy, wartości kolejnych chwil czasowych. Zmiany we wzorcu chodu były realizowane poprzez nieznaczną zmianę wag poszczególnych neuronów oraz współczynników funkcji przejścia.

3.3 Eksperymenty z wykorzystaniem oscylatorów chodu

Po opracowaniu systemu, eksperymenty zostały przeprowadzone zarówno na oscylatorze VDP, jak i ARNN. Oba generatory chodu zachowywały się stabilnie i zgodnie z oczekiwaniami. Granice stabilności parametrów zostały wyznaczone metodami heurystycznymi i różniły się one w zależności od robota oraz generatora i wzorca chodu. Obliczenia były przeprowadzane z wykorzystaniem komputera PC. Dane były następnie transmitowane za pośrednictwem standardu UART do mikroprocesorów robotów. W trakcie eksperymentów były testowane różne rodzaje chodów. W celu zmiany własności chodu zmieniane były poszczególne parametry charakteryzujące dany oscylator. Interesujące wyniki zostały uzyskane podczas zmiany jednego parametru chodu na inny (Rys. 7). Zmiany położenia, prędkości i przyspieszenia następowały w sposób płynny.

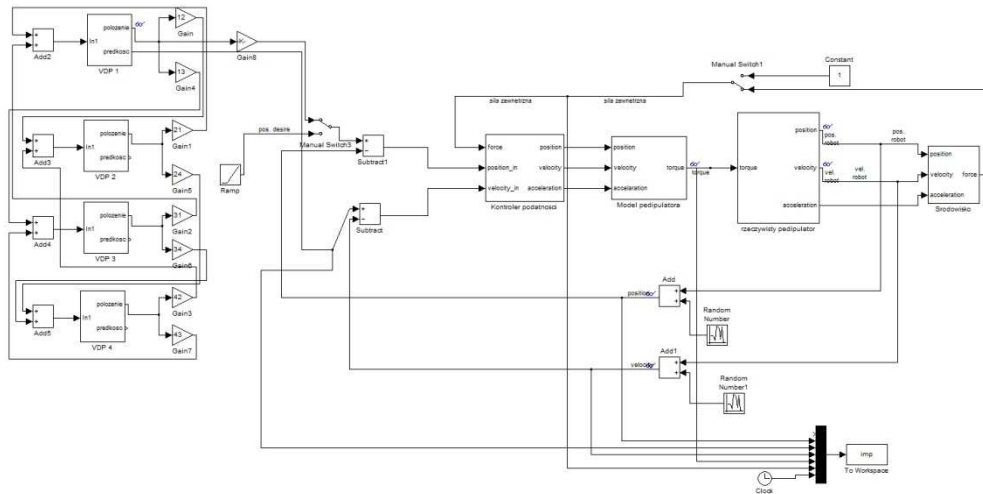
Rysunek 7 przedstawia przykładowe wykresy zmian położenia poszczególnych odnóży oraz wykresy fazowe, podczas zmiany parametru p_1 jednego z oscylatorów VDP. Po przekroczeniu 300 kroku całkowania następuje quasi-losowa zmiana parametru p_1 . System kontrolował, aby oscylator nie stracił stabilności i żeby poszczególne wartości parametrów ruchu mieściły się w zdefiniowanym tunelu błędów.



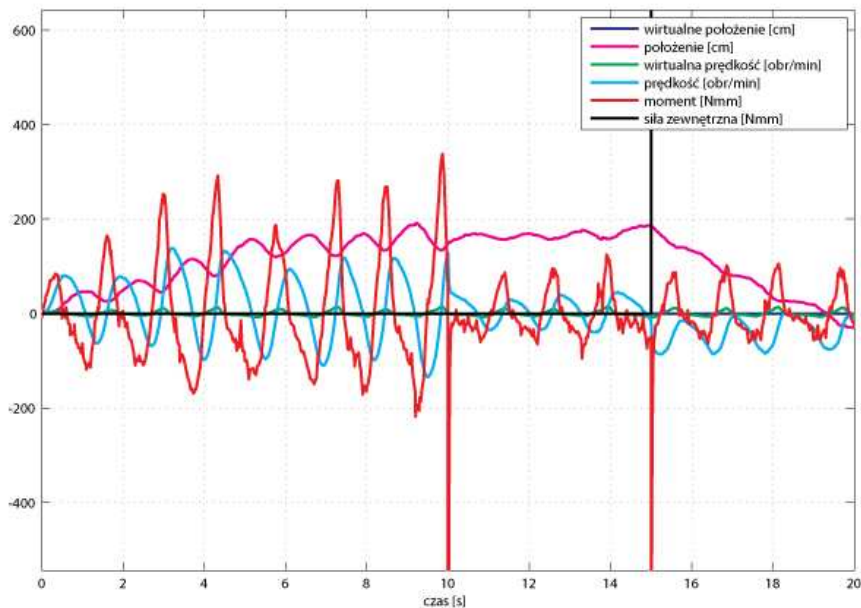
Rys. 6. Wykresy obrazujące skutki quasi-losowych zmian współczynnika p_1 jednego z oscylatorów VDP: *lewy* - zmiany kątów w funkcji czasu, *prawy* - wykresy fazowe

3.4 Sterowanie pedipulatorów z kontrolowaną podatnością

Aby skutecznie sterować roboty, oprócz generacji kolejnych punktów trajektorii potrzebne jest również sterowanie przy uwzględnieniu dynamiki robota [8]. Jeden z eksperymentów polegał na symulacji sterowania pedipulatorów przy pomocy sterownika impedancyjnego. Dzięki użyciu tego rodzaju sterowania możliwe jest wprowadzenie kontrolowanej podatności w wybranych płaszczyznach ruchu robota. W tym przypadku pożądane jest, aby podatność ruchu w płaszczyźnie poziomej (X,Y), była o wiele mniejsza, niż podatność w osi Z. W rozważanym przypadku zdecydowano się kontrolować podatność z użyciem zmiennych łączowych robotów. Zmniejszyła to znacznie ilość obliczeń w stosunku do sytuacji, gdy kontroluje się podatność w układzie związanym z końcówką pedipulatora, a następnie przelicza się ją na parametry zmiennych łączowych. Symulacje przeprowadzono w *Simulinku*, w *Matlabie*. Kolejne punkty trajektorii były zadawane przy pomocy oscylatorów van der Poła (Rys. 8).



Rys. 7. Zaprojektowany sterownik impedancyjny, sprzężony z oscylatorami van der Pola. Eksperymenty polegały na symulacji zderzenia z twardym obiektem (Rys. 9).



Rys. 8. Symulacja zmiany impedancji pedipulatora oraz zderzenia z twardym obiektem

W 10 sekundzie symulacji zmieniono podatność pedipulatora. W wyniku tego, wyraźnie zmniejszyły się tętnienia na złączach, a przebieg prędkości i położenia pedipulatora wygładził się. Po zmniejszeniu podatności w 15 sekundzie symulacji została przyłożona siła zewnętrzna o wartości 700 Nmm. Spowodowało to cofnięcie się pedipulatora robota. Jeżeli siła zanikłaby, system sterowania powróciłby do odtwarzania swojej pierwotnej trajektorii. Jeżeli podatność manipulatora nie zostałaby zmniejszona przed zderzeniem, system sterowania nie

cofnąby pedipulatora. Wyniki symulacji pokazują, że przy prawidłowo dobranych parametrach sterownika impedancyjnego, kierunek zadanej prędkości zmienia się, po zadziałaniu siły przekraczającej założony próg.

Udowodniono tym samym, że można wprowadzić kontrolowaną podatność na poszczególnych złączach. Najprawdopodobniej w podobny sposób jest również realizowany chód u owadów.

4. WNIOSKI I PODSUMOWANIE

W pracy przedstawiono system sterowania robotami kroczącymi oparty na oscylatorach sprzężonych van der Pola oraz rekurencyjnych sieciach neuronowych. Wyniki eksperymentów numerycznych pokazały, iż lepsze pod kątem szybkości obliczeń są sieci neuronowe, które charakteryzują się większą prędkością w stosunku do równań VDP. Rozwiązując równania różniczkowe należało, bowiem przeliczyć co najmniej kilkadziesiąt początkowych kroków całkowania, w celu pozbycia się niestacjonarności towarzyszących równaniom różniczkowym.

Prawdopodobnie w podobne do sztucznych sieci neuronowych „układy sterowania” wyposażone są również owady i gady. Obserwuje się bowiem, że ruch danym odnóżem jest wykonywany często niejako automatycznie.

Przedstawiona sieć rekurencyjna została z powodzeniem wykorzystana do sterowania skonstruowanymi robotami kroczącymi. Roboty sterowane w ten sposób, mogą być w przyszłości używane do wielu celów. Jednym z zastosowań są cele inspekcyjne. Po zamontowaniu kamery mogłyby służyć do oględzin niedostępnych dla pojazdów kołowych przestrzeni. Inne zastosowanie mogłoby się wiązać z eksploracją środowisk, w których konwencjonalne napędy słabo by sobie radziły (lasy, pustynie, obce planety).

Dalsze badania w tym zakresie będą związane z zastosowaniem dodatkowych czujników, które bardziej precyzyjnie określą stan robotów oraz na ich integracji z systemem sterowania.

5. PODZIĘKOWANIA

Pragnę podziękować prof. Edwardowi Jezierskiemu z Instytutu Automatyki Politechniki Łódzkiej za cenne uwagi na temat sterowania impedancyjnego robotów.

LITERATURA

- [1] H. Chuangfeng, L. Pingan, *Reliable gait planning for a quadruped walking robot*. Proc CCDC 2010, s. 1783-1787.
- [2] D. Belter, K. Walas, A. Kasiński, *Distributed control system of DC servomotors for six legged walking robot*, IEEE Explore, EPE-PEMC 2008.

- [3] C. Liu, Q. Chen, J. Zhang, *Coupled Van Der Pol oscillators utilised as Central Pattern Generators for quadruped locomotion*. Proc. CCDC 09, 2009, s. 3677-3682.
- [4] A. Morecki, J. Ekiel, K. Fidelus, *Cybernetyczne systemy ruchu kończyn zwierząt i robotów*, Warszawa 1979.
- [5] D. B. Popović, M. B. Popović, *Design of a Control for a Neural Prosthesis for Walking: Use of Artificial Neural Networks*. Proc. 8th NEUREL 2006, s. 121-128.
- [6] T. Zielińska, *Wykorzystanie Własności Chodu Człowieka i Zwierząt do Syntezy Ruchu Maszyn Kroczących*, Warszawa, Prace Instytutu Biocybernetyki i Inżynierii Biomedycznej Nr 40, 1995.
- [7] T. Zielińska, *Maszyny kroczące*, PWN 2003.
- [8] E. R. Westervelt, J. W. Grizzle at al., *Feedback Control of Dynamic Bipedal Robot Locomotion*, CRC Press, 2007.
- [9] http://www.bostondynamics.com/robot_bigdog.html
- [10] http://www.ai.mit.edu/projects/leglab/robots/Spring_Flamingo/Spring_Flamingo.html

THE USE OF QUASI-CHAOTIC OSCILLATORS TO GENERATE A GAIT RHYTHM OF WALKING ROBOTS

The aim of this study was to develop a control system of autonomous walking robots, that is able to efficiently control the gait rhythm of walking robots, in terms of various properties of the substrate and environment conditions. Experiments were conducted on models of insect walking robots. Gait were generated using the coupled oscillators (van der Pol and Recursive Artificial Neural Networks). It was also carried out simulation studies on the impedance control of pedipulators. With the use of developed system robots were able to work effectively, e.g. to get out of depressions.