

# ROBOTYKA

## Kilka słów o chodzeniu

Słyszając słowo “robot” większość Czytelników wyobraża sobie chyba konstrukcje typu C3PO z “Gwiezdných wojen”, ewentualnie inne iluściannożne maszyny. Takie przynajmniej można odnieść wrażenie po przeczytaniu listów, które nadeszły na mojego e-maila (twilight@callisto.krakow.pl) po opublikowaniu pierwszych części “Robotyki”. Dlatego też ten odcinek cyklu poświęcę kwestiom związanym z maszynami kroczącymi.

Zastanówmy się, co powoduje, że roboty “na nogach” są taką rzadkością? Z natury wiadomo, że nogi są o wiele uniwersalniejsze od jakichkolwiek innych metod poruszania się w ciężkim terenie i tak naprawdę kołom ustępują dopiero na gładkiej nawierzchni. Dlaczego więc nie ma jeszcze maszyn kroczących zastępujących jeepy?

Zasadniczo problem z nogami można podzielić na dwie “klasy”: dotyczące napędu i sterowania. Zaczniemy od problemów sterowania, a dokładniej od kontroli dwunożnej, antropoidalnej maszyny – bo ten temat budzi chyba największe emocje. Poza tym, uniwersalność robotów zaczyna się w momencie, gdy są w stanie wszędzie zastąpić człowieka, a to nie będzie możliwe, dopóki nie będą mogły wejść tam, gdzie i on. Jednak konstruując maszynę na nogach trzeba zwrócić uwagę na problemy, których nie było w przypadku robotów na gąsienicach czy na kołach – na kwestię utrzymywania równowagi, dynamiki ruchu – oczywiście, ten artykuł nie starczy nawet na streszczenie tematu, o którym napisano grube książki obliczeń, mogą tu tylko zaszyfrować niektóre zagadnienia.

### Sterowanie

Zastanówmy się trochę najpierw nad sobą – dokładniej nad tym, jak utrzymujemy równowagę i jak się poruszamy (w końcu z ludzi całkiem zręczne dwunogi). Łatwo sprawdzić, że ludzka figurka wykonana np. z drewna (czyli sztywne) stoi bardzo niestabilnie, jednak człowieka, który posłużył jej za wzór, wyrzucić wcale nie jest tak łatwo. Dlaczego? Człowiek (i każde inne zwierzę, jednak przeważająca reszta popularnej fauny ma 4 nogi i podlega trochę prostszym zależnościom z tego powodu) nieustannie koryguje swoje położenie, wykonuje drobne ruchy, które przesuując jego środek ciężkości zapobiegają przewróceniu się. Zadanie polega (w przypadku spokojnego stania) na utrzymaniu tego środka ciężkości dokładnie ponad podstawą utworzoną przez stopy. Utrata rów-

nowagi następuje, gdy środek ciężkości “zejdzie” sponad tej podstawy. Jeśli tak się stanie, następuje odruchowa reakcja mająca na celu przywrócenie równowagi, a osiągnięcie tego celu możliwe jest na dwa sposoby: Po pierwsze można zmienić rozkład masy ciała w przestrzeni (np. wyciągnąć rękę) tak, aby wypadkowy środek ciężkości znalazł się z powrotem nad podstawą (po czym delikatniejszymi ruchami można powrócić do pozycji “baczność”...). Takie rozwiązanie nie zawsze skutkuje, ponieważ mamy ograniczoną ilość tej masy do manewrowania, a poza tym występuje zjawisko akcji i reakcji – ruch ręki w lewo jest tożsamy z pchnięciem reszty ciała w prawo, więc może przyspieszyć upadek. Oprócz manewrowania masami można przestawić nogę i zmienić tym samym obszar podstawy tak, aby przemieszczony środek ciężkości znalazł się nad nią. To są rzeczy odruchowe i “każdy je wie”, ale trzeba sobie zdać sprawę, że te intuicyjne zdolności muszą zostać “wpojone” każdej dwunożnej maszynie, która ma się swobodnie poruszać.

Mózg ludzki, aby móc utrzymać równowagę całego ciała musi otrzymywać na bieżąco informacje o:

- położeniu wszystkich kończyn względem siebie,
- tym, które z nich mają kontakt z podłożem i w którym punkcie,
- prędkości i kierunku poruszania się,
- położeniu ciała względem pionu,
- przyspieszeniach działających na ciało,
- przeciążeniach “zespołów napędowych”.

Na podstawie tych informacji lokalizuje on nasze ciało w przestrzeni, określa, czy jest to pozycja stabilna, a jeśli nie – decyduje, jakie akcje należy podjąć dla jej ustabilizowania.

Po chwili zastanowienia można łatwo dojść do wniosku, że te same informacje niezbędne będą komputerowi sterującemu robotem. Zrezygnować z czujników położenia stawów nie można z oczywistych względów – są niezbędne dla sprzężenia zwrotnego w sterowaniu serwami, dostarczają również (razem z czujnikami przeciążeń) informacji o przeciążeniu lub uszkodzeniu serwa danego stawu – jeśli nie jest ono w stanie poruszyć kończyny w żądanym kierunku. Dalej patrząc na tę listę: detekcja położenia “ciała” względem pionu i określenie przyspieszeń działających należy do jednego zespołu akcelerometrów liniowych i kątowych (inclinometrów) – u człowieka jest to ucho środ-



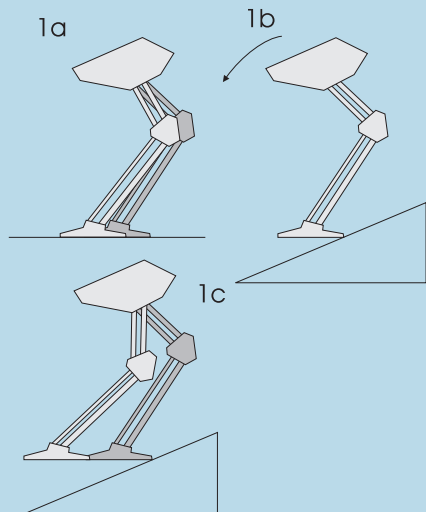
Fot. 1

kowe. Po prostu w spoczynku akcelerometry zwrócą  $9,81\text{m/s}^2$  w kierunku pionowo w dół,  $0\text{rad/s}^2$  przyspieszenia kąтового (czyli: działa tylko przyspieszenie ziemskie). Jeśli robot będzie pochylony, “dół” zacznie być dla niego ukośnie i akcelerometry liniowe wyłapią ten fakt. Jeśli zacznie się przewracać, informacje o zwiększaniu prędkości kątovej napłyną z inclinometrów (akcelerometrów kątowych). Jeśliby tych czujników nie było, robot nawet nie wiedziałby, że leci na pysk. Owszem, teoretycznie jeśli robot poruszałby się samotnie, można obliczyć takie sekwencje sterowania serwami nóg, aby nie tracił równowagi nigdy. Wystarczy jednak, że ktoś zostawi drobiazg, o który robot się potknie i nasza maszyna przebierać będzie nogami w powietrzu leżąc na ziemi. Czyli, że ten zespół “ucha środkowego” jest niezbędny. Dalej pojawi się jeszcze jeden powód, dla którego nie można się pozbyć zmysłu równowagi, ale o tym później.

Kolej na prędkość poruszania się. Parametr ten raczej obliczany jest na podstawie

np. szybkości przebijania nogami, ale również wnioskowany np. na podstawie analizy obrazu otoczenia (o ile wyposażymy robota w kamery i baaardzo silny komputer – science fiction na razie). Przede wszystkim prędkość własną (nawet niewielką) trzeba brać pod uwagę przy jej zmianach. Hamujący robot podlega działaniu siły bezwładności (ciągnącej jego środek ciężkości do przodu), która składając się z siłą ciężarzenia powoduje, że w chwili hamowania “dół” dla robota jest “trochę do przodu”, czyli sytuacja wygląda zupełnie jakby stał na pochylni. Musi odpowiednio odchylić się do tyłu, aby nie paść na to, co służy mu za twarz. Zaś co do detekcji kontaktu z podłożem – wiadomo, że nie trzeba robotowi skóry wyposażonej jak ludzka w co najmniej kilkadziesiąt rozpoznawalnych punktów czułych na dotyk na  $\text{cm}^2$ , ale trzeba wiedzieć, czy robot stoi na całej łapie, czy na jej krawędzi – wyobraźmy sobie robota stojącego na płaskim terenie. A teraz przedstawmy go (w dokładnie takiej samej pozycji) na pochylni. Do robota dojdzie informacja, że przewraca się do przodu, więc zareaguje i przestawi jedną łapę do przodu – tak jakby był na płaskim terenie, po czym... wyłoży się jak długi (patrz rysunek 1). Nawet jeśli będzie mądrzejszy i nie zatrzyma łapy w pozycji z rysunku 1c, to i tak będzie stał “na ostrogach”, co nie jest pozycją stabilną. Wiadomo więc, że dobrym pomysłem jest wyposażenie robota w jakieś czujniki kontaktu w stopach, albo mierzenie sił na odpowiedniku stawu skokowego u robota – po prostu stanięcie na tylnej krawędzi łapy spowoduje, że ciężar robota będzie próbował obrócić jego “stopę” w “kostce” do tyłu. Rozwiązanie takie ma jednak mimo wszystko pewną wadę – nie wiadomo, czy siła skręcająca wynika z zawieszenia łapy w powietrzu, czy np. z pchnięcia robota przez kogoś.

Już na pierwszy rzut oka widać, że jednostka sterująca robotem ma masę danych do przetworzenia na bieżąco (owszem, dostaje



Rys. 1

tylko kilka parametrów na raz, ale robot jest bryłą o skomplikowanej dynamice ruchu, ściśle zależnej od położenia stawów, więc równania ruchu są delikatnie mówiąc kobyłaste, a rozwiązywać je trzeba w czasie rzeczywistym). A jeszcze nie zaczęliśmy chodzić...

Większość maszyn kroczących, budowanych w celach eksperymentalnych, chodzi na zasadzie ciągłego utrzymywania równowagi – co oznacza: najpierw przechylają się do tyłu, tak aby zrównoważyć ciężar nogi wysuwanej do przodu, po czym ostrożnie stawiają tę nogę, później robot przenosi na nią ciężar “ciała”, pochyla się do przodu, aby móc bez utraty równowagi oderwać nogę dotychczas stojącą na podłożu itd. W każdym momencie ruchu środek ciężkości robota jest nad jego podstawą (stojącą na ziemi łapą). Chód taki charakteryzowany jest po pierwsze powolnością (gwałtowniejszy ruch burzy delikatną równowagę), a po drugie chwiejnością – roboty te nie są w stanie najczęściej dostatecznie szybko zareagować na utratę równowagi, żeby mieć szansę ją odzyskać. Chwila zastanowienia pozwala stwierdzić, że ludzie (na wzór których budowane są te maszyny) chodzą zupełnie inaczej, ktoś słusznie zauważył, że chodzenie to ciągle przewracanie się do przodu (nie śmiać się proszę, bo to prawda). Załóżmy, że “ruszamy prawą nogą”: Człowiek najpierw pochyla się do przodu, tracąc tym samym równowagę, po czym lewą nogą zaczyna odpychać się od ziemi do przodu, przyspieszenie to związane jest z siłą bezwładności ciągnącą środek ciężkości do tyłu, ta siła składa się z ciężarzeniem tak, że oś wektora wypadkowego przechodzi przez obrys lewej stopy, stojącej ciągle na ziemi, więc człowiek nie upada. Przyspieszenie ułamek sekundy później się kończy, siła bezwładności znika, ale do tego momentu analizowany delikwent zdążył już postawić prawą nogę na ziemi. Ma teraz pewną prędkość poziomą, jeśli więc zacznie hamować prawą nogą, siła bezwładności będzie działać do przodu, usiłując obrócić go względem punktu utwierdzenia, czyli prawej stopy i mimo iż środek ciężkości nie jest nad prawą stopą, można tak tym hamowaniem wymanewrować, że “wypadkowa siła ciężarzenia” wypadnie akurat tak, że oś jej wektora przejdzie przez prawą stopę. Można już więc oderwać lewą od podłoża, odczekać moment, aż środek ciężkości przeleci nad prawą stopą, zacząć się teraz z kolei z niej wybijać, wyciągając lewą nogę do przodu... itd. Ale zakręciłem. Przeczytajcie jeszcze raz, najlepiej ruszając się jednocześnie. W ani jednym momencie chodu nie jesteśmy w stanie równowagi statycznej. Dlatego też tak trudno jest zatrzymać się “w pół kroku”. Do takiego chodu potrzeba jednak szybkich serwomechanizmów, dysponujących w dodatku dużą mocą w impulsie. Serwa muszą ponadto być elastyczne – większość obciążeń nie może zostać przyjęta “na

zablokowane zębatki”, bo konstrukcja ulegnie zniszczeniu. Serwa elektryczne praktycznie nie mają zbyt dużych szans – silniki o dużych momentach obrotowych, krótkich startach i małej masie, przy okazji precyzyjnie kontrolowane za marzenie – niestety ściętej głowy. Najbardziej zaawansowany w sensie naśladowania człowieka projekt “wolnostojącego” robota o jakim mi wiadomo – Shadow Walker, zbudowany w Wielkiej Brytanii (fot. 1) – wykorzystuje nadzwyczaj pomysłową konstrukcję siłowników pneumatycznych (o nich jeszcze napiszę kawałek dalej). Honda Robot jest “technicznie” dużo doskonalszy, ale o szczegółach jego budowy Honda nie udostępnia żadnych danych, wiadomo tyle, że usiłują naśladować ten dynamiczny chód, o którym pisałem wyżej. Inna dwunożna maszyna, zbudowana do badań nad dynamiką chodu – Spring Flamingo, skonstruowany w MIT (fot. 2), pracuje na tzw. szeregowych serwach elektrycznych, ale chodzi “na uwięzi” – podtrzymywany z boku, tak że może przewrócić się tylko do przodu lub do tyłu. Żaden z tych robotów nie nosi swojego sterowania (nie mówiąc już o zasilaniu) na pokładzie. Powoli jednak czas poświęcić trochę o serwach.

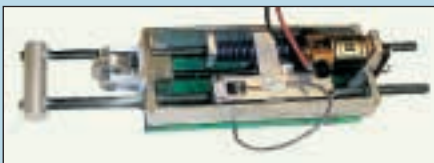


Fot. 2

## Napęd

Większość konstrukcji opiera się na razie na napędzie elektrycznym, jednak niesie to ze sobą pewne problemy. Zasadniczy polega na tym, że od napędu wymaga się połączenia zdolności do szybkich ruchów prawie bez obciążenia (np. 0,5s na wyprostowanie stawu kolanowego przy łapaniu równowagi) i stosunkowo powolnych, ale z kilkukrotnie większym obciążeniem. Efektywna moc jest

ta sama (raz duże przyspieszenie w krótkim czasie małej masy – samej kończyny, drugi – małe przyspieszenie dużej masy – całego ciała – w długim czasie). Poza tym serwa muszą być odporne na chwilowe przeciążenia – powinny “podać się”, jeśli nie mogą utrzymać – np. przy upadku. Pewnym rozwiązaniem są zastosowane w ww. Flamingo Spring zespoły serw elektrycznych, z których napęd przenoszony jest poprzez sprężynę z zamontowanym czujnikiem naciągu/wydłużenia na cięgna napędzające “ciąg dalszy”. Pozwala to jednocześnie uelastycznić napęd i mierzyć obciążenia na stawach. Co do konstrukcji (fot. 3): Silnik modelarski napędza przez pasek zębaty śrubę, której obroty powodują przesuwanie metalowego mostka po prowadnicach. Mostek połączony jest z cięgnami za pośrednictwem sztywnej sprężyny, co zapewnia elastyczność serwa. Napęd śrubowy zapobiega przenoszeniu ударов mechanicznych na silnik. Ze sprężyną sprężono czujniki położenia jej końców, dzięki czemu wiadomo, w jakiej pozycji znajduje się serwo i o ile siły zewnętrzne odształciły sprężynę.



Fot. 3

Zupełnie inne – moim zdaniem rewelacyjne – rozwiązanie zastosowali konstruktorzy Shadow Walkera. Udało im się skonstr... no niezupełnie, nie oni sprawę wymyślili, ale oni zastosowali. Zreplikowali pod względem charakterystyk dynamicznych ludzkie mięśnie, uzyskując lekkie i łatwe w sterowaniu elastyczne siłowniki. Połowa Czytelników (ci, którzy jeszcze o tym projekcie nie słyszeli) czeka teraz na opis superhipernowoczesnej elektroniki itd. Pudło. Pomysł jest do odtworzenia w domu, a polega na założeniu na cienkościenną rurkę tzw. chińskiej pułapki na palce. Bardziej szczegółowo:

Chińską pułapką nazywa się popularnie plecionkę w kształcie rury (w oryginale ze sznurka, w naszym przypadku z drutu lub np. nylonu), która rozciągana zmniejsza swoją średnicę. Do środka rozciągniętej (więc o małej średnicy) plecionki trzeba wsunąć odpowiednio długą cienkościenną rurkę z gumy, po czym końce plecionki i końce rurki jakoś połączyć (np. w końce rurki wcisnąć kołki, na zewnątrz nałożyć obejmy zaciskowe). Składając to w całość trzeba umożliwić właczanie powietrza do rurki – np. w jednym z korków osadzić rurkę. Teraz pompując do środka powietrze powoduje się zwiększanie średnicy rurki wewnętrznej i tym samym skracanie długości całego zespołu (ze względu na splot plecionki).

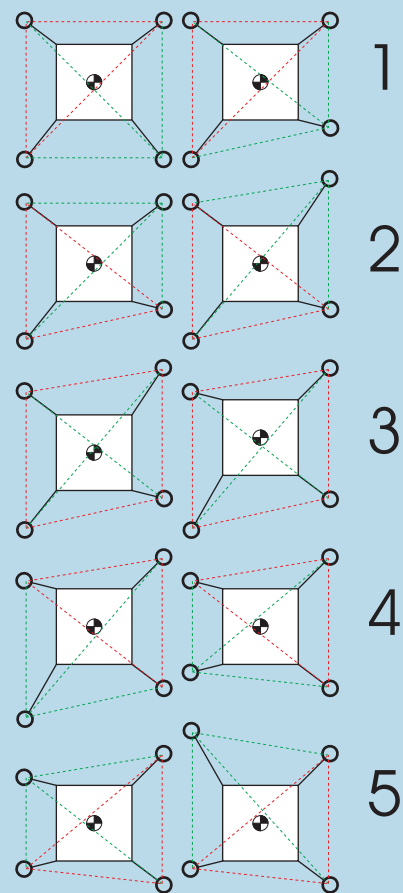
Siłownik tak skonstruowany jest w stanie osiągnąć przy ciśnieniu 5 atmosfer siłę skurczu rzędu:

40kg (średnica 20mm), 120kg (średnica 20mm), a nawet 240kg – przy średnicy 50mm. Są to parametry niebagatelne, zwłaszcza że stosunek mocy do masy przekracza 400:1, gdy przy tych samych jednostkach wynosi 16:1 dla niezbyt niezwykłego silnika – serwa prądu stałego. (wszystkie dane za Shadow Robot Company Ltd. 251 Liverpool Road London N1 1LX). Problem z zastosowaniem tego typu napędu to konieczność stosowania dość szybkich zaworów sterowanych elektrycznie, no i zapewnienie ciągłego dopływu sprężonego gazu roboczego. To pierwsze nie jest poza zasięgiem nawet amatorów (o czym świadczy to, że Shadow Robot nie powstał w laboratorium jakiegoś konsorcjum przemysłowego), a drugie... No cóż, można albo zamontować kompresorek z silnikiem spalinowym – teoretycznie możliwe, ale owocuje hałasem i spalinami w laboratorium, albo załadować robotowi na plecy zbiornik ze sprężonym np. powietrzem. To drugie rozwiązanie niesie pewną pułapkę: pobór powietrza jest stosunkowo duży, kilogramowy zbiornik wystarczyłby teoretycznie na jakieś 5-10 minut pracy, ALE rozprężany gaz ochładza się dość gwałtownie, co po kilku chwilach kończy się tym, że zbiornik osiąga temperaturę rzędu minus 25°C... i ciśnienie gazu robi się małe. Można temu zaradzić podgrzewając na bieżąco zbiornik z gazem, jednak jest to igranie z ogniem, bo podgrzany za dużo zbiorniczek pod ciśnieniem dajmy na to 50 atmosfer jest w stanie wysadzić laboratorium w powietrze.

Widać więc, że na razie na popularne dwunogi przyjdzie jeszcze poczekać. A co z większą liczbą nóg?

## Czworonogi

Jakiś czas temu na łamach Elektroniki dla Wszystkich ukazał się artykuł prezentujący robota na czterech łapach, opartego na serwach modelarskich. Niestety, autor nie za bardzo przemysłał mechanikę ruchu, co zaowocowało propozycją umieszczenia dodatkowej masy do balansowania w celu utrzymania równowagi... która nie jest potrzebna. Jak zaraz zauważymy, dołożenie tych dwóch łap zasadniczo zmniejsza ilość problemów związanych z poruszaniem się. Jak taki czworonóg chodzi? Jeśli nie będziemy eksperymentować z chodem dynamicznym, a pozostaniemy przy ciągłym utrzymywaniu równowagi, to algorytm jest nadzwyczaj prosty: Na rysunku 2 zaznaczyłem fazy pierwszego kroku, w lewej kolumnie stan tuż przed ruchem (na czerwono zaznaczono obszar podstawy), w prawej – tuż po ruchu. Zaznaczyłem również środek ciężkości, dla ułatwienia nie uwzględniając wpływu ruchu kończyn na jego położenie (jeśli go uwzględ-



Rys. 2

nić, łapy trzeba będzie trochę szerzej stawiać i tyle). Pierwsza faza to przestawienie tylnej prawej łapy do przodu, następnie prawa przednia, przesunąć korpus do przodu opierając się na wszystkich czterech łapkach, lewa tylna, lewa przednia, przesunąć korpus na wszystkich czterech łapach i mamy symetryczną sytuację do tej z kroku trzeciego. Ciąg dalszy w kółko. Prawda, że nieskomplikowane? Łatwo jednak zauważyć, że jest tak przyjemnie, dopóki chodzimy po płaskim, równym terenie. Środek ciężkości oscyluje cały czas dość blisko krawędzi podstawy i o wywrotkę nietrudno. Pies czy inne zwierzę też mają ucho środkowe i jak zaczynają się przewracać, podpierają się odpowiednią łapą. Jeśli chcemy uniknąć montowania precyzyjnych czujników, należałoby zwiększyć liczbę nóg do sześciu albo nawet ośmiu – wtedy można chodzić tak, że środek ciężkości zawsze siedzi solidnie na podstawie i nie ma groźby wywrotki nawet na stromym stoku (notabene, owady nie mają ucha środkowego... I mają sześć nóg. Nie traktowałbym tego jako zbiegu okoliczności. To samo z ośmionóżnymi pajęczakami)

No dobra. Dalszy ciąg w następnym odcinku. Zainteresowanych proszę o odzew!

Marek Lewandowski  
twilight@callisto.krakow.pl