

XVII. Samochody i poduszkowce

Wszystkie samochody i poduszkowce mają wspólną cechę, że działają w sposób dwuwymiarowy. O ile nie wskoczyły na rampę, oba pojazdy pozostają na ziemi lub na wodzie. W tym rozdziale omówimy siły, które stoją za metodami podróży każdego pojazdu, i omówimy, jak dokładnie je modelować w swoich symulacjach.

Samochody

W poniższych sekcjach chcemy omówić pewne aspekty fizyki stojące za ruchem samochodów. Podobnie jak poprzednie cztery części, celem tej części jest wyjaśnić, na przykład, pewne zjawiska fizyczne. Chcemy również dać ci podstawowe zrozumienie mechaniki związanej z ruchem samochodowym, aby w razie potrzeby symulować jeden w swoich grach. Zgodnie z tematem tego tekstu będziemy mówić o mechanice w sensie ruchu sztywnego ciała, a nie w tym sensie, w jaki sposób działa silnik spalinowy, ani jak przekazywana jest moc przez układ przeniesienia napędu na koła. itp. Wszystkie są wewnątrz samochodu jako sztywne ciało, a my skupimy się na siłach zewnętrznych. Omówimy jednak, w jaki sposób przeniesiony moment obrotowy na koło napędowe przekłada się na siłę, która popycha samochód wzdłuż.

Oporność

Zanim porozmawiamy o tym, dlaczego samochody ruszają do przodu, porozmawiamy o tym, co spowalnia ich działanie. Kiedy samochód zjeżdża z drogi, doświadcza dwóch głównych elementów oporu, które próbują go spowolnić. Pierwszy składnik to opór aerodynamiczny, a drugi to opór toczenia. Całkowity opór odczuwany przez samochód jest sumą tych dwóch składników:

$$R_{\text{total}} = R_{\text{air}} + R_{\text{rolling}}$$

Opór aerodynamiczny to przede wszystkim tarcie powierzchniowe i opór ciśnienia podobny do tego, którego doświadczają pociski omówione w rozdziale 6, a także samoloty i łodzie omówione we wcześniejszych częściach. Tutaj znowu możesz użyć znanej formuły przeciągania:

$$R_{\text{air}} = (1/2)\rho V^2 S_p C_d$$

Tutaj ρ (rho) jest masową gęstością powietrza, V jest prędkością samochodu, S_p jest rzutowanym czołowym obszarem samochodu normalnym do kierunku V , a C_d jest współczynnikiem oporu. Typowe zakresy współczynników oporu dla różnych typów pojazdów wynoszą od 0,29 do 0,4 dla samochodów sportowych, od 0,43 do 0,5 dla ciężarówek odbierających, od 0,6 do 0,9 dla przyczep ciągnikowych i od 0,4 do 0,5 dla przeciętnego samochodu ekonomicznego. Współczynnik oporu jest funkcją kształtu pojazdu, to znaczy stopnia kanciastości lub usprawnienia. Opływowe style nadwozia mają niższe współczynniki oporu; na przykład, Korweta Chevy ma niski współczynnik oporu wynoszący 0,29, podczas gdy typowy trakserownik bez owiewek ma wysoki współczynnik oporu do 0,9. Możesz użyć tych współczynników w swoich symulacjach, aby dostroić zachowanie różnych typów i kształtów pojazdów. Kiedy opona toczy się po drodze, ma opory toczenia, które mają tendencję do opóźniania jej ruchu. Opór toczenia nie jest oporem tarcia, ale ma do czynienia z odkształceniem opony podczas toczenia. Obliczenie teoretyczne jest trudne, ponieważ jest to funkcja wielu skomplikowanych czynników, takich jak deformacja opon i dróg, nacisk na powierzchnię styku opony, właściwości elastyczne opony i materiałów drogowych, chropowatość opony powierzchni dróg i ciśnienie w oponach, żeby wymienić tylko kilka, więc zamiast tego będziesz musiał polegać na empirycznej formule. Formuła użycia jest następująca:

$$R_{\text{rolling}} = C_r W$$

Daje to opór toczenia na oponę, gdzie w jest ciężarem obsługiwany przez oponę, a C_r jest współczynnikiem oporu toczenia. C_r to po prostu stosunek toczenia siła oporu do ciężaru obsługiwany przez oponę. Na szczęście producenci opon zapewniają zwykle współczynnik oporu toczenia opon w warunkach projektowania. Typowe opony samochodowe mają wartość C_r około 0,015, a opony do samochodów ciężarowych mieszczą się w zakresie od 0,006 do 0,01. Jeśli założysz, że samochód ma cztery identyczne opony, możesz oszacować całkowity opór toczenia samochodu, zastępując wagę całkowitą samochodu w poprzednim równaniu.

Moc

Teraz, kiedy już wiesz, jak obliczyć całkowity opór na samochodzie, możesz łatwo obliczyć moc wymaganą do pokonania oporu przy danej prędkości. Moc to miara ilości pracy wykonanej przez siłę lub moment obrotowy w czasie. Praca mechaniczna wykonywana siłą jest równa sile razy odległości, jaką porusza się przedmiot pod działaniem tej siły. Jest wyrażony w jednostkach, takich jak stopy funtów. Ponieważ moc jest miarą pracy wykonywanej w czasie, jej jednostki są na przykład stopofuntami na sekundę. Zwykle moc w kontekście mocy silnika samochodowego wyrażana jest w jednostkach mocy, gdzie 1 moc silnika równa się 550 ft-lbs / s. Aby obliczyć moc potrzebną do pokonania całkowitego oporu przy danej prędkości, wystarczy użyć następującej formuły:

$$P = (R_{\text{total}} V) / 550.$$

Tutaj P to moc w jednostkach mocy, a R_{total} to całkowity opór odpowiadający prędkości samochodu, V . Uwaga: w tym równaniu R_{total} musi być w jednostkach funtowych, a V musi być w jednostkach stóp na sekundę. Teraz nie jest to moc wyjściowa silnika potrzebna do osiągnięcia prędkości V dla twojego samochodu; jest to raczej wymagana moc dostarczona przez koło napędowe do osiągnięcia prędkości V . Moc zainstalowanego silnika będzie wyższa z kilku powodów. Po pierwsze, wystąpią straty mechaniczne związane z dostarczaniem energii z silnika przez przekładnię i układ napędowy do opony. Moc rzeczywiście osiągnie oponę w postaci momentu obrotowego, który, biorąc pod uwagę promień opony, wytworzy siłę F_w , która pokona całkowity opór. Siła ta jest obliczana w następujący sposób:

$$F_w = T_w / r$$

Tutaj F_w to siła dostarczana przez oponę na drogę, aby pchać samochód wzdłuż, T_w jest momentem obrotowym opony, a r jest promieniem opony. Drugi powód, dla którego moc zainstalowanego silnika będzie większa, to fakt, że część mocy silnika zostanie przeniesiona do innych systemów w samochodzie. Na przykład do naładowania akumulatora i uruchomienia klimatyzatora wymagana jest moc.

Odległość zatrzymania

W normalnych warunkach droga hamowania jest funkcją układu hamulcowego i jak mocno kierowca przykładła hamulce: im mocniej działają hamulce, tym krócej droga hamowania. Tak nie jest, gdy opony zaczynają się ślizgać. Pod poślizgiem warunki, odległość zatrzymania jest funkcją siły tarcia, która rozwija się między oponami a drogą, oprócz nachylenia jezdni. Jeśli samochód jedzie pod górkę, odległość poślizgu będzie krótsza, ponieważ grawitacja pomaga spowolnić samochód, a przyspieszać samochód i zwiększać odległość poślizgu, gdy samochód jedzie w dół. Istnieje prosta formuła uwzględniająca te czynniki, które można wykorzystać do obliczenia odległości poślizgu:

$$d_s = V^2 / [2g (\mu \cos \phi + \sin \phi)]$$

Tutaj d_s jest odległością poślizgu, g przyspieszenia z powodu grawitacji, μ współczynnikiem tarcia między oponami i drogą, V początkową prędkością samochodu i ϕ nachylenie jezdni (gdzie dodatni kąt

oznacza podjazd, a ujemny oznacza zjazd). Zauważ, że to równanie nie bierze pod uwagę żadnego oporu aerodynamicznego, który pomoże spowolnić samochód. Współczynnik tarcia będzie różnił się w zależności od stanu opon i nawierzchni drogi, ale w przypadku gumy na nawierzchni współczynnik tarcia dynamicznego wynosi zwykle około 0,4, a współczynnik statyczny około 0,55. Podczas obliczania faktycznej siły tarcia między oponą a drogą, powiedzmy w symulacji w czasie rzeczywistym, użyjesz tej samej formuły, którą pokazaliśmy ci w części 3:

$$F_f = \mu W$$

Tutaj F_f jest siłą tarcia przyłożoną do każdej opony, zakładając, że nie jest ona toczona, a W jest wagą wspierana przez każdą oponę. Jeśli przyjmiesz, że wszystkie opony są identyczne, możesz użyć całkowitej masy samochodu w poprzednim wzorze, aby określić całkowitą siłę tarcia przyłożoną do wszystkich opon.

Kierowanie

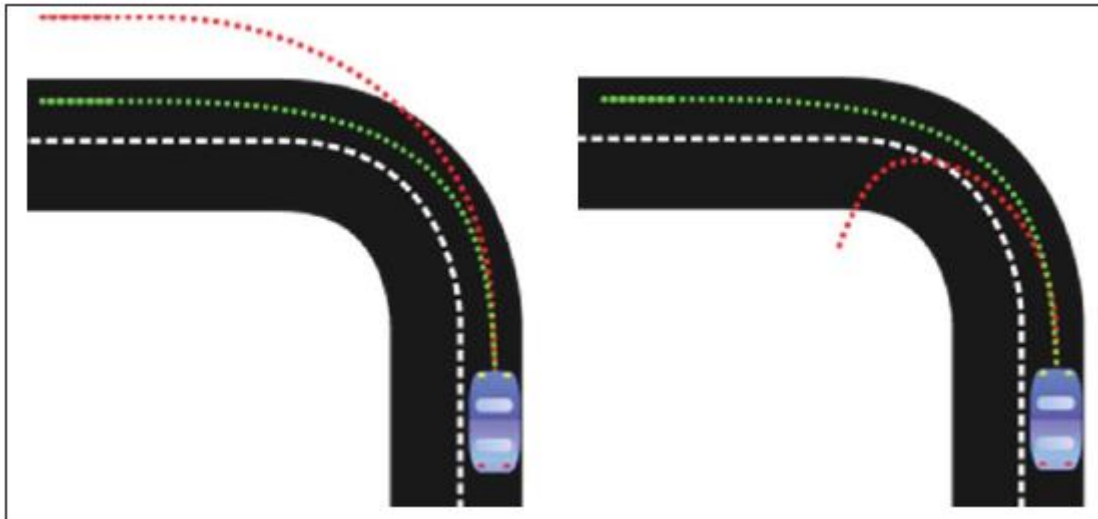
Po obróceniu kierownicą samochodu, przednie koła wywierają siłę boczną, taką, że samochód zaczyna się obracać. Pod względem kątów Eulera byłaby to odchylenie, chociaż kąty Eulera nie są zwykle używane w dyskusjach o toczeniu samochodów. Nawet jeśli prędkość samochodu jest stała, odczuwa on przyspieszenie, ponieważ jego wektor prędkości zmienił kierunek. Pamiętaj, że przyspieszenie to czas zmiany prędkości, który ma zarówno wielkość, jak i kierunek. Aby samochód utrzymywał zakrzywioną drogę, musi istnieć siła dośrodkowa ("poszukiwanie centrum" po grecku), która działa w samochodzie. Podczas jazdy w torze zwrotnym czujesz wyraźne przyspieszenie odśrodkowe lub siłę skierowaną od środka skrętu. To przyspieszenie jest tak naprawdę wynikiem bezwładności, tendencji twojego ciała i samochodu do kontynuowania swojej pierwotnej ścieżki, i nie jest prawdziwą siłą działającą na samochód lub twoje ciało. Prawdziwą siłą jest siła dośrodkowa, a bez niej twój samochód będzie kontynuował swoją prostą ścieżkę, a nie wzdłuż krzywej. Jednym z najważniejszych aspektów wyścigów jest wykonywanie tak szybko, jak to możliwe, ale bez utraty kontroli. Im dłużej możesz czekać, aby zwolnić na turę, i tym szybciej może zacząć ponownie przyspieszać, tym wyższa będzie średnia prędkość. Warto zauważyć, że kiedy ludzie jeżdżą w wyścigach samochodowych, to co naprawdę je zaskakuje, nie jest przyspieszenie, ale ogromne spowolnienia, jakie mogą wywołać siły hamowania. Samochód Formuły 1 regularnie ulega spowolnieniu o wartości 4g, przy czym 5-6 g stanowi najwyższą wartość w niektórych wyścigach. Większość drogowych samochodów sportowych może osiągnąć około 1 g siły hamowania. Dzięki temu pojazdy wyścigowe zachowują prędkość do momentu wkroczenia w zakręt. Kiedy obracasz kierownicę w samochodzie, opony wytwarzają siłę dośrodkową w kierunku środka krzywej poprzez tarcie z powierzchnią drogi. Wynika z tego, że maksymalna siła tarcia między oponami a drogą musi przekraczać wymaganą siłę dośrodkową. Matematycznie przyjmuje to następującą nierówność:

$$\mu_s N > mv^2/r$$

Przyspieszenie dośrodkowe jest kwadratem prędkości stycznej, v , podzielonym przez promień obrotu, r . Ta pomnożona przez masę pojazdu, m , daje siłę wymaganą do skrętu. Dostępną siłą jest statyczny współczynnik tarcia pomnożony przez normalną siłę, N . Przepisując tę formułę, możemy rozwinąć uproszczoną maksymalną prędkość pokonywania zakrętów w następujący sposób:

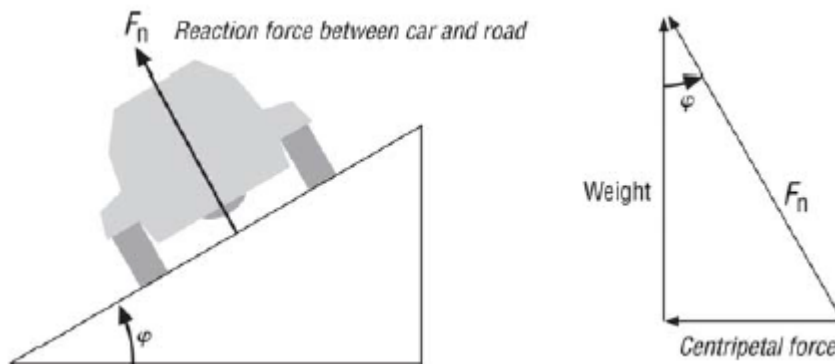
$$v_{\text{limit}} < \sqrt{\mu \frac{Nr}{m}}$$

Jeśli ta prędkość zostanie przekroczona, siła pokonywania zakrętów przekroczy statyczny współczynnik tarcia, a opony zaczną się ślizgać. Może kusić zastąpienie normalnej siły N ciężarem pojazdu (masa razy grawitacja) i zlikwidować masę samochodu, ale normalna siła nie zawsze może być uproszczona jako taka, jak to omówimy w chwili. Ponadto, w rzeczywistości, waga pojazdu rzadko jest równomiernie rozłożona na wszystkie cztery opony i zdecydowanie nie jest, gdy samochód przyspiesza lub zwalnia. Zasadniczo przyspieszanie powoduje przesunięcie ciężaru na opony rufowe, a spowolnienie powoduje przesunięcie ciężaru na opony przednie. Jest to ważne, ponieważ w zależności od wagi, przednie lub tylne opony będą miały mniej dostępne tarcie. Jeśli jeden lub inne zestawy opon zaczynają się ślizgać, samochód będzie albo podsterowny, albo nadsterowny (patrz Rysunek 17-1).



Jeśli przednie koła się ślizgają, podsterowność samochodu i łuk są większe niż zamierzone przez kierowcę. Zwykle jest to spowodowane zbyt szybkim podróżowaniem w zakręcie i zbyt wąskim ruchem. Jeśli jednak kierowca złamie się, a nawet po prostu odpuści gaz, nastąpi przesunięcie ciężaru do przodu. Dzięki temu przednie koła nie będą się ślizgać, ale zbyt agresywne spowodują poślizg kół tylnych podczas przenoszenia ciężaru z nich. Powoduje to, że samochód obraca się bardziej, niż zamierzał kierowca, a nawet może spowodować obrót. Te dwa warunki ograniczają prędkość, z jaką samochód może wykonać zakręt, a także wielkość opóźnienia, jaką samochód może pokonać po rozpoczęciu skrętu. Aby zwiększyć prędkość graniczną, v_{limit} , musimy zwiększyć normalną siłę. Moglibyśmy to zrobić zwiększając masę samochodu, ale miałyby to negatywny wpływ na zdolność samochodu do przyspieszania lub zwalniania. Lepszym rozwiązaniem jest wykorzystanie właściwości aerodynamicznych do stworzenia tak zwanego docisku dociskowego. Być może widzieliście wyścigi a nawet samochody uliczne z dużymi skrzydłowymi cechami zwanymi spojlerami. Samochody Formuły 1 mają także przednie części boczne przypominające skrzydła. Są one jak skrzydła samolotu, ale odwrócone, tak że zamiast ciągnąć pojazd, faktycznie pchają pojazd w dół. Skrzydła te zwiększają zatem normalną siłę, a ich efekty są proporcjonalne do prędkości, dzięki czemu większa siła dociskowa jest dostępna przy wyższych prędkościach ... właśnie wtedy, gdy jest potrzebna. W rzeczywistości, niektóre bardzo szybkie samochody wytwarzają tak duży docisk, że gdyby droga była odwrócona, samochód pozostałby przyklejony do nawierzchni i byłby w stanie prowadzić do góry nogami. Kompromisem dla tej zwiększonej prędkości granicznej na zakrętach jest zwiększony opór powodowany przez płaty. Ogranicza to maksymalną prędkość pojazdu w obszarach drogi bez narożników. Dobrą praktyką jest umożliwienie użytkownikom wyboru kąta natarcia dla płatów swoich pojazdów. Zmusza ich to do wyboru między opcją wyższej prędkości maksymalnej a wolniejszym pokonywaniem zakrętów lub szybszym pokonywaniem zakrętów z niższą prędkością maksymalną. Możesz zauważyć, że na niektórych drogach rogi nie są płaskie. To się nazywa bank lub przewyższenie jezdni. W kącie, w którym

samochód normalnie poślizgnąłby się, przewyższenie pomaga utrzymać samochód na zakręcie, ponieważ gdy samochód jest nachylony, rozwija się komponent siły, który działa w kierunku środka krzywizny zakrętu (patrz Rysunek 17-2).



Poniższa prosta formuła dotyczy kąta przechyłki jezdni do prędkości samochodu i współczynnika tarcia między oponami a drogą:

$$\tan \phi = \frac{v^2}{g r} - \mu_s$$

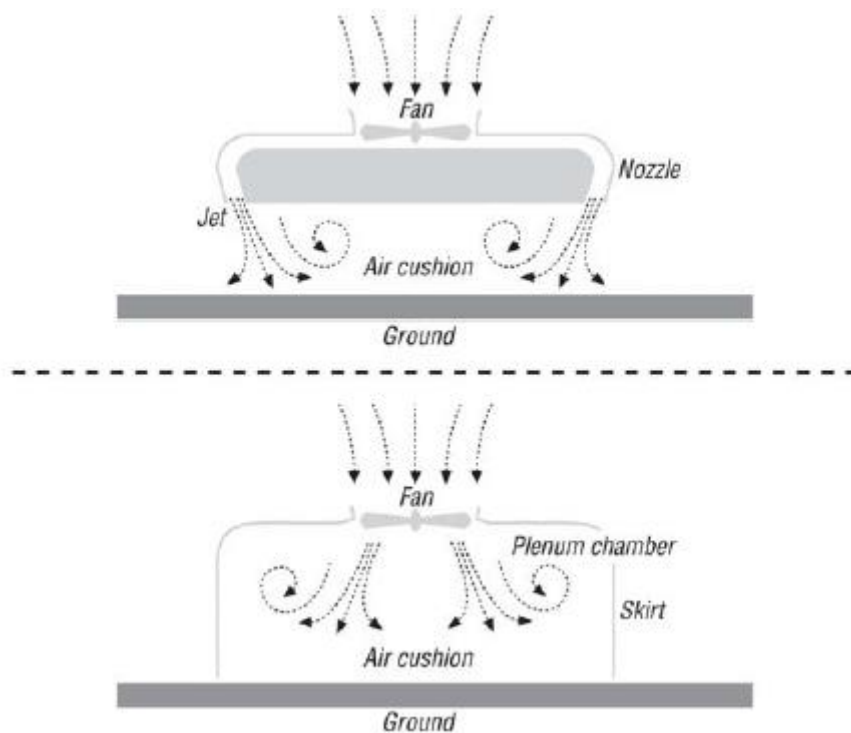
Tutaj ϕ jest kątem przechyłki (jak pokazano na rysunku 17-2), v_t jest stycznym składnikiem prędkości samochodu jadącego dookoła zakrętu, g jest przyspieszeniem z powodu grawitacji, r jest promieniem krzywizny i μ_s jest statycznym współczynnikiem tarcia między oponami a drogą. Jeśli znasz ϕ , r i μ , możesz obliczyć prędkość, z jaką samochód zacznie wymykać się z zakrętu i z drogi. Dynamika pojazdu to złożona dziedzina, a jeśli interesuje Cię wysoce realistyczna gra symulacyjna jazdy samochodem, zalecamy zapoznanie się z tym tematem.

Poduszkowiec

Poduszkowce lub pojazdy z poduszkami powietrznymi (ACV) trafiły do gry wideo lub dwa ostatnio. Ich atrakcyjność zdaje się wynikać z ich futurystycznej aury, dużej prędkości i zdolności lewitacji, która pozwala im nigdzie jechać. W rzeczywistości poduszkowce działają od lat pięćdziesiątych XX wieku i były wykorzystywane w bojach, poszukiwaniach i ratownictwie, transporcie ładunków, promów i rekreacyjnych ról. Występują we wszystkich kształtach i rozmiarach, ale wszystkie działają prawie tak samo, z podstawową ideą uwolnienia statku od ziemi lub wody w celu zmniejszenia oporu. W części 9 omówiliśmy siły, które musimy wymodelować, rozważając poduszkowiec, a teraz omówimy je bardziej szczegółowo.

Jak działa poduszkowiec

Pierwszy poduszkowiec projektuje pompowane powietrze przez pierścieniową dyszę wokół obrzeża jednostki (patrz Figura 17-3).



Duże wentylatory służą do zasilania powietrza przez dyszę pod jednostką. Ten strumień powietrza tworzy obszar o stosunkowo wysokim ciśnieniu nad obszarem pod jednostką, co skutkuje siłą nośną netto. Siła podnoszenia musi być równa ciężarowi jednostki, jeśli ma ona osiągnąć lot w powietrzu. Ten rodzaj podnoszenia jest znany jako podnoszenie aerostaticzne. Wysokość zawisu jest ograniczona przez ilość dostępnej mocy i zdolność wentylatora podnoszącego do pompowania wystarczającej ilości powietrza przez dyszę: im wyższa wysokość zawisu, tym większe zapotrzebowanie mocy. Takie podejście okazało się niepraktyczne, ponieważ wysokość zawisu była bardzo ograniczona i sprawiała, że prześwit między twardą strukturą jednostki a ziemią (lub wodą) był zbyt mały, aby pokonać wszystkie, z wyjątkiem najmniejszych przeszkód. Rozwiązaniem tego problemu było założenie elastycznej osłony wokół statku, aby pomieścić poduszkę powietrzną w tak zwanej komorze wyrównawczej (patrz Rysunek 17-3). Takie podejście znacznie zwiększyło prześwit między podłożem a twardą strukturą jednostki, nawet jeśli szczelina między spodem spódnicy a podłożem była bardzo mała. Jest to podstawowa konfiguracja większości poduszkowców działających dzisiaj, chociaż istnieją różne rodzaje wzorów spódnicy. Niektóre z tych spódnicy są prostymi zasłonami, podczas gdy inne są wyrafinowanym workiem ciśnieniowym i układem palców. W rezultacie poduszkowiec wyposażony w spódnicy może usunąć stosunkowo duże przeszkody bez uszkodzenia ich twardej struktury, a spódnicy po prostu zniekształca i dostosowuje się do terenu, na którym działa jednostka. Rzeczywiste obliczenie aerostaticznej siły nośnej jest dość skomplikowane, ponieważ rozkład ciśnienia w poduszce powietrznej jest nierównomierny, a także dlatego, że należy również wziąć pod uwagę wydajność systemu wentylatorów podnoszących. Dostępne są teorie dotyczące zarówno konfiguracji pierścieniowej jak i komory, ale są one poza zakresem tej książki. Poza tym, dla symulacji gry, ważne jest, abyś zdał sobie sprawę, że siła nośna musi być równa ciężarowi jednostki, aby utrzymać równowagę w unoszącym się locie. W idealnej sytuacji zdolność poduszkowca do wyeliminowania kontaktu z podłożem (lub wodą), nad którą działa, oznacza, że może on podróżować stosunkowo szybko, ponieważ nie odczuwa już sił kontaktowych. Zauważ, że powiedzieliśmy idealnie. W rzeczywistości poduszkowiec często toczy się i toczy, powodując przeciąganie części spódnicy, a każda przeszkoda, która wchodzi w kontakt ze spódnicy, spowoduje większy opór. W każdym razie, chociaż wyeliminowanie kontaktu z podłożem jest dobre dla prędkości, nie jest tak dobre dla możliwości

manewrowania. Poduszkowce są bardzo trudne do kontrolowania, ponieważ ślizgają się po ziemi. Mają tendencję do kontynuowania swojej pierwotnej trajektorii nawet po próbie ich obrócenia. Obecnie istnieje kilka środków stosowanych w różnych konfiguracjach do sterowania kierunkowego. Niektóre poduszkowce używają pionowych sterów ogonowych podobnych do samolotu, podczas gdy inne faktycznie wektor ich ciągu napędowego. Jeszcze inni używają sterów strumieniowych, które zapewniają bardzo dobrą kontrolę. Wszystkie te środki są dość łatwe do modelowania w symulacji; wszystkie są po prostu siłami działającymi na jednostkę w pewnej odległości od jej środka ciężkości, aby stworzyć moment odchyłający. Przedstawiono symulację 2D, którą przeprowadziliśmy w części 9 jak obsługiwać ster strumieniowy. Możesz sterować pionowymi ogonami, jak pokazaliśmy ci w części 15.

Oporność

Rzućmy teraz okiem na niektóre siły oporu działające na poduszkowiec podczas lotu. Aby to zrobić, będziemy operować operacją na lądzie niezależnie od pracy nad wodą, ponieważ istnieją pewne specyficzne różnice w siłach oporu doświadczanych przez poduszkowiec. Kiedy poduszkowiec działa na gładkim lądzie, całkowity opór działający na poduszkowiec ma charakter aerodynamiczny. Zakłada się, że opór wywołany przeciąganiem spódnicy lub uderzaniem przeszkód jest ignorowany. Trzy elementy oporu aerodynamicznego to:

- Tarcie cielesne i opór ciśnienia lepkiego na korpusie jednostki
- Indukowany opór, gdy jednostka jest rozbita
- Opór pędu

W formie równania całkowity opór jest następujący:

$$R_{\text{total}} = R_{\text{viscous}} + R_{\text{induced}} + R_{\text{momentum}}$$

Pierwszym z tych elementów, lepkiem oporem na ciele, jest ten sam rodzaj oporu, jakiego doświadczają pociski przelatujące w powietrzu, jak wyjaśniono w Części 6. Ten opór szacuje się za pomocą znanej obecnie formuły:

$$R_{\text{viscous}} = (1/2)\rho V^2 S_p C_d$$

Tutaj ρ jest masową gęstością powietrza, V prędkością poduszkowca, S_p rzutowanym czołowym obszarem jednostki normalnej do kierunku V , a C_d współczynnikiem oporu. Typowe wartości C_d dla dzisiejszych jednostek w zakresie od 0,25 do 0,4. Kolejny element przeciągania, wywołany opór, jest rezultatem tego, że statek wykonuje pochyloną postawę podczas ruchu. Kiedy dziób statku wystaje pod kątem τ , pojawi się element wektora aerostatycznego, który działa w kierunku przeciwnym do V . Składnik jest w przybliżeniu równy ciężarowi statku w stosunku do stycznej kąta pochylecia:

$$R_{\text{induced}} \approx W (\tan \tau)$$

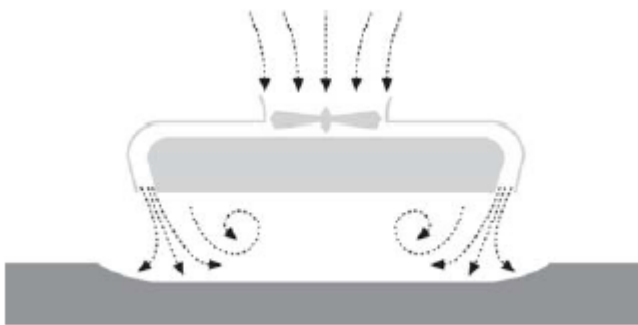
Wreszcie, rozpęd dynamiczny wynika ze zniszczenia poziomego pędu powietrza, w stosunku do jednostki wchodzącej do wlotu wentylatora windy. Ten komponent jest trudny do obliczenia chyba że znasz właściwości całego układu podnoszącego, tak, że znany jest masowy przepływ powietrza do wentylatora. Biorąc pod uwagę masowe natężenie przepływu, R_{momentum} jest równe masowemu natężeniu przepływu razy prędkości jednostki:

$$R_{\text{momentum}} = (dm_{\text{fan}} / dt) V$$

Masowe natężenie przepływu wyrażane jest w jednostkach takich jak kg / s, które po pomnożeniu przez prędkość w m / s daje N. W części 9 wspomnieliśmy, że korzystne jest, aby środek tego oporu znajdował się za środkiem ciężkości. Daje to kierunkową stabilność, ponieważ statek będzie starał się wskazywać na pozorny wiatr. Zastanów się, czy statek przechylił się pod pewnym kątem, prędkość do przodu tworzy wiatr, który uderza teraz w poduszkowiec. Jeśli środek wysiłku tej siły znajduje się przed środkiem ciężkości, będzie chciał bardziej odchylić naczynie, zwiększając siłę boczną i powodując jeszcze większy opór, aż naczynie obróci się o 180 stopni! Jeśli środek wysiłku wiatru znajduje się za środkiem ciężkości, statek zacznie wirować z powrotem na wiatr. Nie chcesz, aby środek ciężkości do tej pory znajdował się na rufie, ponieważ jest zbyt trudno obrócić naczynie, ale ogólnie lepiej jest wyprostować naczynie, niż wymagać ciągłego sterowania, aby utrzymać równomierny kurs. Dotyczy to również łodzi żaglowych i nosi nazwę sternika pogodowego. Tak samo dzieje się w samolotach. Rozwiązanie w samolocie jest podobne do tego w poduszkowcach: aby dopasować płetwy ogonowe, które przesuwają środek rufy, zwiększając jego kierunkową stabilność. Jeśli zdecydujesz się modelować obrażenia w swojej symulacji, utrata płetwy ogonowej spowoduje, że bardzo trudno będzie kontrolować naczynie. Oprócz tych trzech elementów oporu, poduszkowiec doświadcza innych form oporu podczas pracy nad wodą. Te dodatkowe elementy to opór falowy i zwilżony opór. Równanie dla całkowitego oporu można zatem skorygować dla działania na wodzie w następujący sposób:

$$R_{total} = R_{viscous} + R_{induced} + R_{momentum} + R_{wave} + R_{wetted}$$

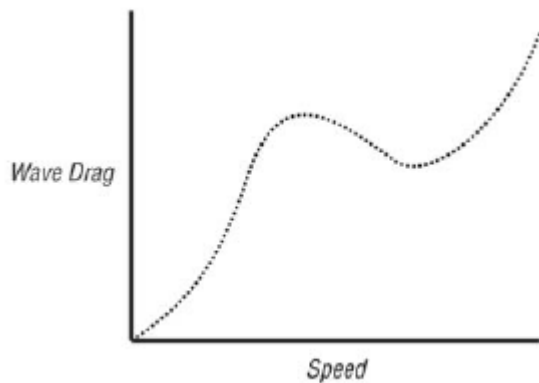
Gdy poduszkowiec działa nad wodą, poduszka powietrzna tworzy wgłębienie na powierzchni wody z powodu ciśnienia poduszki (patrz Rysunek 17-4). Przy zerowej do niskiej prędkości ciężar tej wypartej objętości wody jest równy ciężarowi statku, tak jak gdyby statek unosił się w wodzie wspieranej przez pływalność. Gdy statek zaczyna się poruszać, ma tendencję do podskakiwania przez dziób. Kiedy tak się dzieje, powierzchnia wody w obniżonym obszarze jest w przybliżeniu równoległa do dna jednostki. Wraz ze wzrostem prędkości obniża się obniżenie, a kąt nachylenia ma tendencję do zmniejszania.



Fala przeciągania jest wynikiem tego obniżenia i jest równa poziomym komponentom siły nacisku działające na powierzchnię wody w obszarze obniżonym. Jak się okazuje, przy małych kątach nachylenia i przy niskich prędkościach, opór falowy ma ten sam rząd wielkości co indukowany opór:

$$R_{wave} \approx W (\tan \tau)$$

Ponieważ opór fali jest proporcjonalny do wielkości depresji, ma tendencję do bycia najwyższym niskie prędkości i spadki przy wyższych prędkościach roboczych. Gdybyśmy wykreślili krzywą oporu fali jako funkcję prędkości dla typowego poduszkowca, odkrylibyśmy, że nie jest to prosta, czy nawet paraboliczna krzywa, ale raczej ma garb na krzywej przy niższym zakresie prędkości, ponieważ zilustrowane na rysunku 17-5.



Istnieje kilka teoretycznych metod leczenia fali oporu w literaturze, które mają na celu przewidzieć szybkość, z jaką ten garb występuje wraz z jego wielkością. Teorie te wskazują, że garb zależy od geometrii planowego poduszkowca i ma tendencję do występowania przy prędkościach w zakresie od $\sqrt{gL} / 2$ do \sqrt{gL} , gdzie g jest przyspieszeniem z powodu grawitacji, a L jest długością poduszki powietrznej. W praktyce charakterystykę oporu falowego poduszkowca zazwyczaj najlepiej określa się za pomocą testów modelowych. Tak zwana zwilżona opona jest funkcją kilku rzeczy:

- Fakt, że części kadłuba i spódnicy mają tendencję do uderzania o powierzchnię wody podczas lotu
- Wpływ aerozolu na kadłub i spódnicę
- Zwiększenie ciężaru, gdy poduszkowiec zamoczy się, a czasami nabiera wody

Trudne do przewidzenia opory zwilżane są trudne do przewidzenia, a w praktyce opierają się na testach modelowych, aby określić ich wielkość dla konkretnego projektu. Ważne jest jednak, aby zauważyć, że jest to zazwyczaj znaczący składnik oporu, który czasami stanowi aż 30% całkowitej siły oporu.

Kierowanie

W części 9 poduszkowiec był sterowany za pomocą dziobowego steru strumieniowego, który pchał poprzecznie do środka środka ciężkości. W rzeczywistości większość poduszkowców sterowana jest przez wektorowanie ciągu wentylatora napędowego za pomocą sterów zamocowanych bezpośrednio za wentylatorem. Można to modelować, przechylając siłę napędową. Najważniejszą cechą, którą należy zapamiętać na temat poduszkowca sterowniczego, jest to, że nie będą się obracać jak samochód czy łódź. Poduszkowiec, ponieważ ma mniejsze tarcie w swoim otoczeniu, potrzebuje więcej czasu na skręcanie i ma tendencję do kontynuowania w kierunku, w którym zmierzał podczas obracania się. Po obróceniu siła działa wzdłuż nowego wektora. Jednym z możliwych manewrów w poduszkowcu jest szybkie obrócenie naczynia, a następnie wyłączenie ciągu napędowego. To pozwoliłoby ci podróżować w jednym kierunku i wskazywać w innym tak długo, jak długo twoja siła niesie cię. To może być bardzo użyteczne w ostrzeliwaniu wrogów lub po prostu wyłapywaniu punktów stylu.