Fordonsdynamik med reglering

Jan Åslund
jaasl@isy.liu.se
Associate Professor

Dept. Electrical Engineering
Vehicular Systems
Linköping University
Sweden

Föreläsning 8

Vehicle Stability Control ESP

Kärt barn har många namn

AYC - Active Yaw Control
VDC - Vehicle Dynamics Control
ESP - Electronic Stability Program

I fortsättningen används ESP som gemensam förkortning eftersom den är vanligast åtminstone för tillfället.

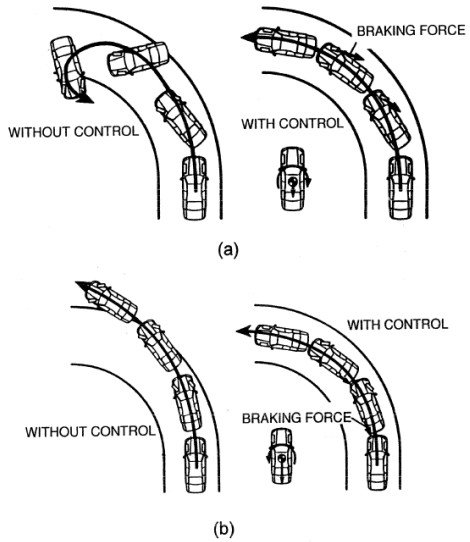
ESP: Övergripande funktion

Genomgång av figur 5.24 i Wong.

För att uppnå önskad funktion behöver man

- Beskriva bilens önskade beteende. Detta är inte trivialt eftersom det kräver en uppfattning om förarens önskan.
- Beskriva bilens aktuella beteende.
- Relatera till de sensorer och aktuatorer som finns, och till underliggande reglersystem.
- Ta hänsyn till förarens beteende i en pressad situation.
- Utforma ett styrsystem baserat på ovanstående.

Figur 5.24



ESP: Mål

Skapa ett sladdhämmande moment ΔM baserat på bilens uppförande jämfört med önskat beteende.

Vi börjar med att titta på kraven på kunskap om bilens aktuella uppförande.

Hur många variabler behövs?

ESP: Krav på kunskap om bilens uppförande

Hur beter sig en bil i stabil kurvtagning (relaterat till dynamiska variabler)?

En bil med konstant fart i en kurva med konstant krökning har konstant Ω_z, dvs konstant girvinkelhastighet (yaw-rate på engelska och ofta betecknad $\dot{\Psi}$).

Ett första villkor på reglerfunktionen:
Reglera Ω_z

Detta är bakgrunden till den ursprungligen vanliga termen AYC - Active Yaw(-rate) Control

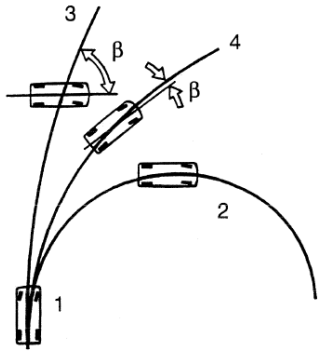
ESP: Krav på kunskap om bilens uppförande

Hur beter sig en bil i stabil kurvtagning (relaterat till dynamiska variabler)?

Det är viktigt att inse att det inte räcker med konstant Ω_z, dvs konstant yaw-rate.

Genomgång av figur 5.23 i Wong

Figur 5.23



1 STEP INPUT AT STEERING WHEEL
2 ON HIGH FRICTION ROAD
3 ON SLIPPERY ROAD WITH STEERING CORRECTION AND YAW RATE CONTROL
4 ON SLIPPERY ROAD WITH BOTH YAW RATE AND SIDE SLIP ANGLE CONTROL

ESP: Krav på kunskap om bilens uppförande

Villkoret på sidrörelse som kan formuleras i V_y men det normala är att införa fordonets sidavdrift β

Definiera fordonets sidavdrift (body slip på engelska)

$$\beta = \tan^{-1}(\frac{V_y}{V_x})$$

Vi får ett andra villkor på reglerfunktionen:

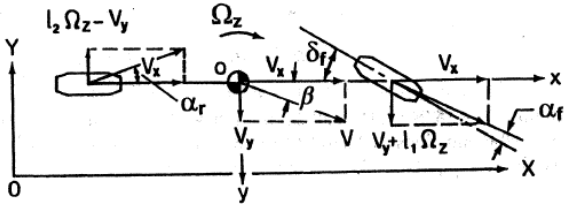
Reglera β

Detta är bakgrunden till att den ursprungligen vanliga termen AYC - Active Yaw(-rate) Control inte är lika populär längre.

ESP: Krav på kunskap om bilens uppförande

Slutsatsen att det krävs två variabler att reglera på.

Vi väljer Ω_z och β.



ESP: Önskvärt beteende

Regleruppgiften består alltså i att reglera Ω_z och β.

Vilka börvärden ska man använda?

Här kommer föraren in i bilden och vad vet vi om personen bakom ratten? Det vi vet är som vanligt förarens agerande på sina reglage: ratt, pedaler och växelspak. (De två senare är inte primära här men är viktiga för underliggande reglering som ABS/TC.)

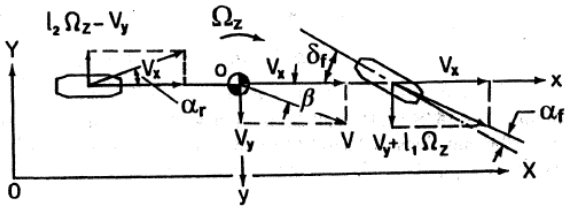
Uppgift: relatera styrvinkel, δ, till börvärden på Ω_z och β.

ESP: Önskvärt beteende

Hur ska vi relatera styrvinkel, δ, till lämpliga börvärden på Ω_z och β som beskriver ett gott uppförande hos fordonet.

Utgår från värdena vid stationär kurvtagning.

Önskat beteende: Girvinkelhastigheten

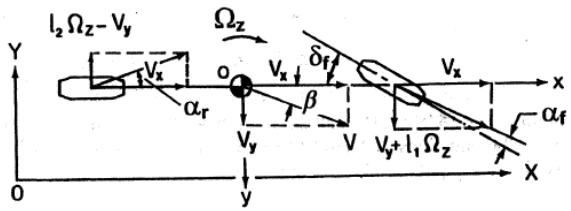


$$\delta_f = \frac{L}{R} + K_{us}\frac{V^2}{gR}, \qquad \Omega_z = \frac{V}{R}$$

Eliminerar vi kurvradien R så får vi sambandet

$$\Omega_z^{nom} = \frac{V}{L + K_{us}V^2/g}\delta_f$$

Önskat beteende: Sidavdrift



$$\delta_f = \frac{L}{R} + K_{us}\frac{V^2}{gR}, \qquad \beta^{nom} = \frac{l_2}{R} - \alpha_r = \frac{l_2}{R} - \frac{l_1 m V_x^2}{2C_{\alpha_r}LR}$$

$$\beta^{nom} = \frac{l_2 - \frac{l_1 m V_x^2}{2C_{\alpha_r}L}}{L + K_{us}V^2/g}\delta_f$$

ESP: Reglermål

Vi är nu redo att formulera reglermålen (i matematiska termer)

Reglera bilen så att den reagerar på rattutslag, δ, så att girvinkelhastighet, Ω_z, och sidavdrift, β, beter sig som under stabil stationär kurvtagning.

Välj som referensvärden

$$\Omega_z^{nom} = \frac{V_x}{L + K_{us}V_x^2/g}\delta_f$$

och

$$\beta^{nom} = \frac{l_2 - \frac{l_1 m V_x^2}{2C_{\alpha_r}L}}{L + K_{us}V^2/g}\delta_f$$

ESP: Övergripande funktion

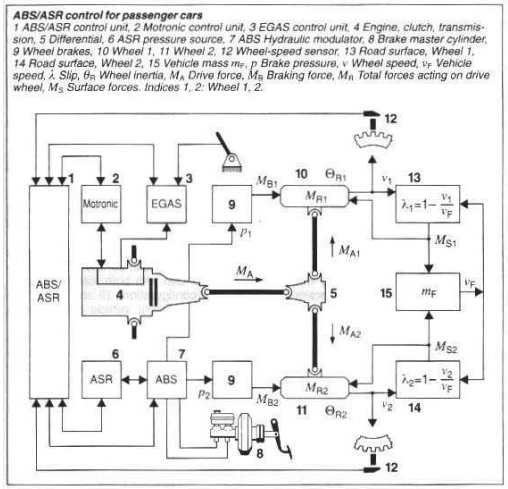
Vi har nu kommit en bit på väg.

För att uppnå önskad funktion behöver man

- Beskriva bilens önskade beteende. Detta är inte trivialt eftersom det kräver en uppfattning om förarens önskan.
- Beskriva bilens aktuella beteende.
- Relatera till de sensorer och aktuatorer som finns, och till underliggande reglersystem.
- Ta hänsyn till förarens beteende i en pressad situation.
- Utforma ett styrsystem baserat på ovanstående.

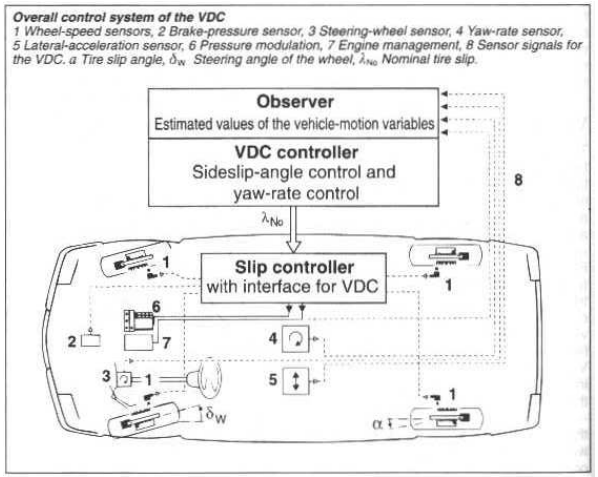
Vi ska nu översiktligt titta på den tredje punkten.

ESP: Underliggande reglersystem



Kombinerad arkitektur för ABS och Traction Control (ASR på tyska).

ESP: Ett exempel



Ett exempel på arkitektur.

ESP: Sensorer

Följande sensorsignaler finns tillgängliga.

- δ Styrvinkel [rad].
- $\dot{\psi}$ Girhastighet [rad/s].
- $\omega_{1,2,3,4}$ Rotationshastigheter för respektive hjul [rad/s].
- a_{lat} Lateral acceleration [m/s^2].

Det finns också sensorer i det hydrauliska bromssystemet men vi går inte in i sådan detalj.

ESP: Aktuellt beteende

Uppgift: Bestäm aktuellt Ω_z, V_x och β.

Enklaste ansatsen (tillräcklig i laborationen) är att

- Ω_z bestäms direkt ur sensorn för $\dot{\psi}$, girhastigheten [rad/s].
- V_x bestäms ur $\omega_{1,2,3,4}$ rotationshastigheterna för respektive hjul [rad/s]. Välj rätt hjul.
- β bestäms genom att integrera a_{lat} laterala accelerationen [m/s^2]. Då får man V_y och med användning av V_x ovan erhåller man via definitionsformeln β

ESP: Aktuellt beteende

Uppgift: Bestäm aktuellt Ω_z, V_x och β.

Enklaste ansatsen kan förbättras.
Inte ens V_x är enkel, dvs inte ens en "vanlig" hastighetsmätare är enkel.

Vi vet att dynamiken i ett förenklat fall ges av

$$\dot{\mathbf{u}} + M^{-1}A\mathbf{u} = M^{-1}B\delta$$

Det är naturligt att förbättra estimeringen av Ω_z, V_x och β genom att använda en **observatör**.

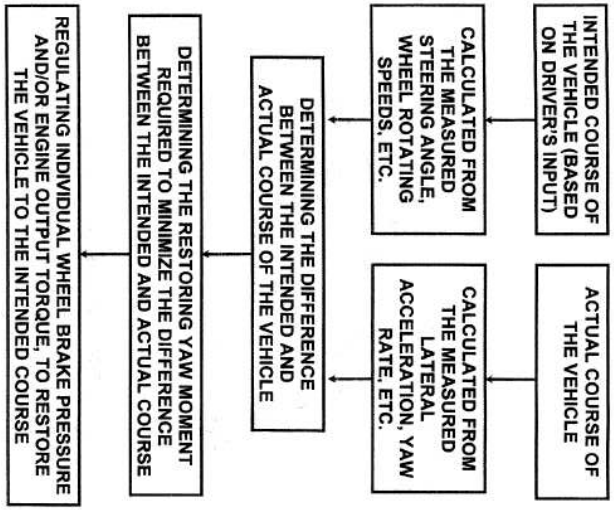
ESP: Övergripande arkitektur

Genomgång av figur 5.22 i Wong.

Relatera till figur 5.24 i Wong.

ΔM, korrigerande moment kring bilens masscentrum.

Figur 5.22



ESP: Styrlag

Inför ΔM, korrigerande moment kring bilens masscentrum som mellanstyrvariabel.

Antag att vi har nödvändiga variabler såsom $(\delta, v_x, v_y, \dot{\Psi})$ från sensorer och observatörer.

Det gäller alltså att finna en styrlag

$$\Delta M = \Delta M(\delta, v_x, v_y, \dot{\Psi})$$

Välj ΔM så att reglermålen uppnås.
Det är då naturligt att använda

$$\Delta M = \Delta M(\beta^{nom} - \beta, \Omega_z^{nom} - \Omega_z)$$

ESP: Styrlag

Enklaste ansatsen är att proportionellt återkoppla de två storheter man vill hålla nere

$$\Delta M = k_1(\beta^{nom} - \beta) + k_2(\Omega_z^{nom} - \Omega_z)$$

där k_1, k_2 är regulatorparametrar som trimmas empiriskt.

Notera att $k_1 = 0$ ger ren "yaw-rate control" med möjlig problembild enligt figur 5.23 i Wong.

Fundera på vilka tecken k_1, k_2 ska ha.

ESP: Styrlag

Ett alternativ till empirisk trimmning av k_1, k_2 är att införa ett optimeringskriterium såsom

$$\lim_{T\to\infty} \int_0^T (\beta^{nom} - \beta)^2 + \rho(\Omega_z^{nom} - \Omega_z)^2 dt$$

där ρ är en parameter som beskriver balansen mellan girhastighetsföljning och sidavdrift.
Liknar ett LQG-kriterium men β och Ω_z^{nom} är olinjära funktioner av tillstånden.

ESP: Effektuering med bromsar

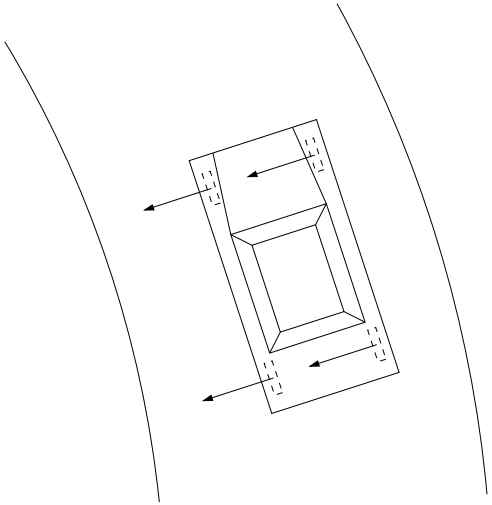
Uppgiften är nu att givet ett önskat moment på bilen, ΔM, skapa detta moment genom att individuellt bromsa olika hjul.

För att realisera detta kan komplicerade strategier användas, men vi begränsar oss nu till en enkel variant som är tillräcklig för laborationen i kursen.

Viktig strategifråga:
Vilket (vilka) hjul ska bromsas i olika situationer?

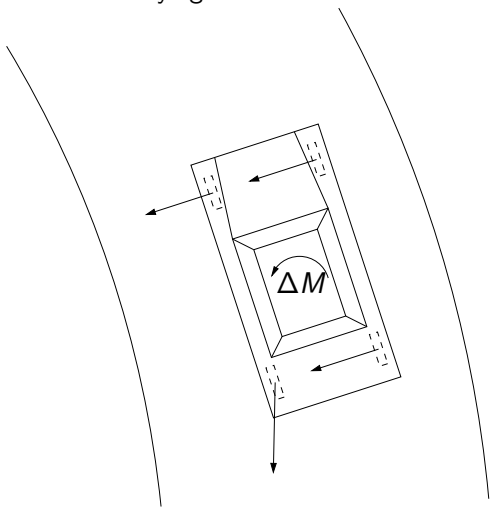
ESP: Val av hjul att bromsa

Schematisk skiss av situationen för diskussion av vilket hjul att bromsa.



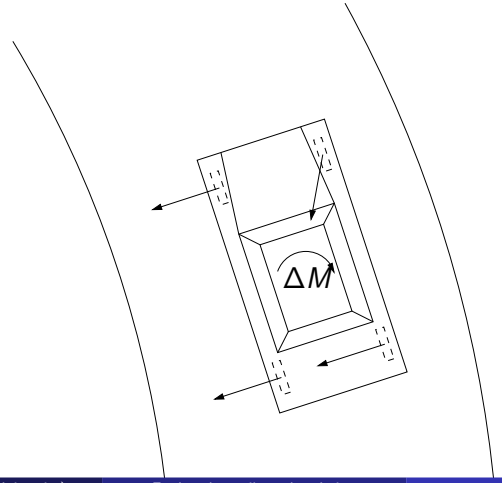
ESP: Val av hjul att bromsa

Med ΔM som i figur ska uppenbart ett vänsterhjul bromsas.
Fram eller bak? Sidkraftsanalys ger att det är bak som ska bromsas.



ESP: Val av hjul att bromsa

Med ΔM som i figur ska uppenbart ett högerhjul bromsas.
Med bromsat framhjul ger den minskade sidkraften ett moment i önskad riktning.



ESP: Effektuering med bromsar

Uppgiften är alltså att givet ett önskat moment på bilen, ΔM, skapa detta moment genom att individuellt bromsa olika hjul.

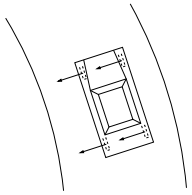
Strategi:
Vid överstyrning, när ett upprätande moment krävs, bromsas ett framhjul.
Vid understyrning, när ett vridande moment krävs, bromsas ett bakhjul.

Kvantitativt gäller det att finna den erforderliga bromskraften, F, som funktion av det önskade momentet ΔM och styrvinkel δ.

Löses fall för fall för de fyra fallen: höger- och vänstersväng, med respektive över- och understyrning.

ESP: Effektuering med bromsar, Fall 1

Ett fordon i vänstersväng, $\Omega_z < 0$.

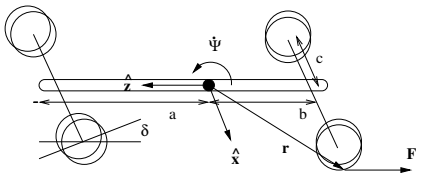


Antag att fordonet överstyr vilket medför $\Delta M > 0$. Styrvinkeln, δ, är i figuren negativ.
Ett upprätande moment krävs. Det realiseras genom att bromsa höger framhjul.

$$
\begin{aligned}
r &= a\hat{x} + c\hat{y} \\
F &= |F|(-\cos(-\delta)\hat{x} + \sin(-\delta)\hat{y}) = -|F|(\cos\delta\hat{x} + \sin\delta\hat{y}) \\
M &= r \times F = |F|(-a\sin\delta + c\cos\delta)\hat{z}
\end{aligned}
$$

ESP: Effektuering med bromsar, Fall 2

Ett fordon i vänstersväng, $\Omega_z < 0$.



Antag att fordonet understyr vilket medför $\Delta M < 0$. Styrvinkeln, δ, är i figuren negativ.
Ett vridande moment krävs. Det realiseras genom att bromsa vänster bakhjul.

$$\begin{aligned} r &= -b\hat{x} - c\hat{y} \\ F &= -|F|\hat{x} \\ M &= r \times F = -|F|c\hat{z} \end{aligned}$$

ESP: Effektuering med bromsar, Fall 3 och 4

De två återstående fallen gäller fordon i högersväng, $\Omega_z > 0$, och är analoga med vänstersväng.

Notera dock olika teckenbyten.

Antag att fordonet överstyr. Ett upprätande moment realiseras genom att bromsa vänster framhjul, och momentet som krävs är mindre än noll.

Antag att fordonet understyr. Ett vridande moment realiseras genom att bromsa höger bakhjul, och momentet som krävs är större än noll.

ESP: Effektuering med bromsar

I samtliga fall löses den erforderliga bromskraften, F, ut ur sista ekvationen som funktion av det önskade momentet ΔM och styrvinkel δ.

Vid en verklig realisering tilllkommer att hantera det underliggande bromssystemet så att man erhåller de bromskrafter man önskar men vi går inte in på detta.

ESP: Problem kring förarbeteende

Det visar sig att många förare överreagerar i utsatta situationer.

Vid sladd yttrar det sig i alltför häftiga rattutslag.

Problemställning: Finns det några vettiga åtgärder som kan införlivas i styrsystemet?

ESP: Tillägg för hantering av förarbeteende

Häftiga rattutslag resulterar via

$$\Omega_z^{nom} = \frac{V_x}{L + K_{us} V_x^2/g}\delta$$

och

$$\beta^{nom} = \frac{l_2 - \frac{l_1 m V_x^2}{2C_{\alpha_r} L}}{L + K_{us} V^2{}_x/g}\delta_f$$

i för stora nominella värden.

Hur kan man begränsa Ω_z^{nom} och β^{nom}?

ESP: Tillägg för hantering av förarbeteende

Det är inte lönt att kräva större sidkrafter än underlaget medger i förhållande till farten.
Vi har

$$F_{y_{max}} = m a_{y_{max}} < \mu m g$$

Nu vet vi inte μ men kan skaffa oss en uppfattning via $a_{y_{trigg}} = \mu g$ när det börjar sladda.
Vi har också

$$a_y = \dot{V}_y + V_x \Omega_z$$

Ansätter vi lite grovt att $\dot{V}_y = 0$ precis i starten av sladden så får vi

$$\Omega_z^{nom} < \frac{\mu g}{V_x}$$

Inför denna begränsning i styrsystemet.

ESP: Tillägg för hantering av förarbeteende

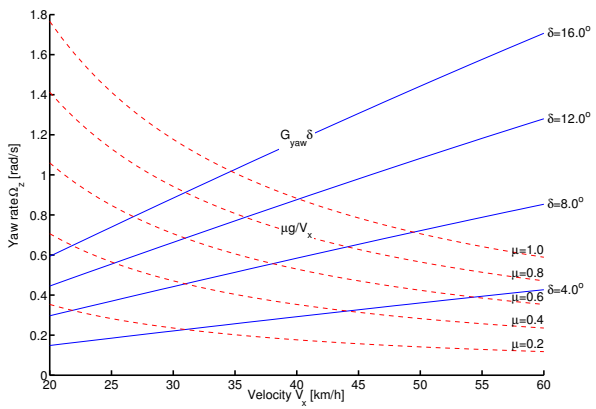


Illustration av begränsning av Ω_z^{nom}.

ESP: Tillägg för hantering av förarbeteende

Vi får

$$\Omega_z^{nom} = \frac{V_x}{L + K_{us} V_x^2/g}\delta \quad om \quad \Omega_z^{nom} < \left|\frac{\mu g}{V_x}\right|$$

$$\Omega_z^{nom} = \left|\frac{\mu g}{V_x}\right| sign(\Omega_z^{nom}) \quad annars$$

Notera att detektering/diagnos krävs utöver filtrering (observatör) för att identifiera att sladd sker.

Ansatsen $\dot{V}_y = 0$ i starten av sladden är grov så om man säger att den termen tar maximalt 15 % av a_y så kan man använda

$$\Omega_z^{nom} < |0.85\frac{\mu g}{V_x}|$$

ESP: Tillägg för hantering av förarbeteende

Begränsning av β_{nom}?

Illustrerar med en empirisk gräns

$$\beta_{max}^{nom} = atan(0.02\mu g)$$

En bakgrund till att den fungerar är att β är liten när man har kontroll på fordonet. (I laborationen kan man använda $\beta^{nom} = 0$ med gott resultat.)

ESP: Tillägg för hantering av förarbeteende

Man får alltså

$$\beta^{nom} = \frac{l_2 - \frac{l_1 m V_x^2}{2C_{\alpha r} L}}{L + K_{us} V^2/g}\delta_f \quad om \quad |\beta^{nom}| < atan(0.02\mu g)$$
$$\beta^{nom} = |atan(0.02\mu g)| sign(\beta^{nom}) \quad annars$$

där man skattar μg på som innan.

ESP: Tillägg för hantering av förarbeteende

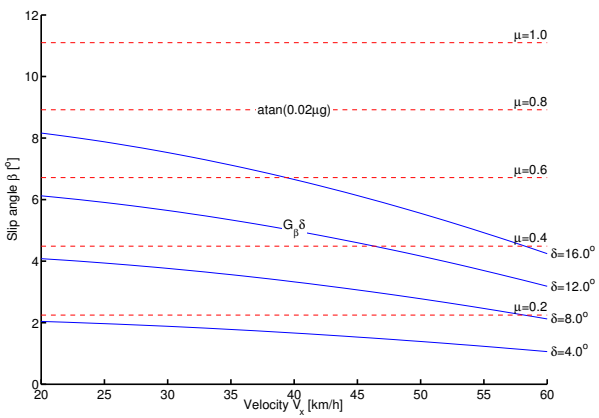


Illustration av begränsning av β^{nom}. För $\mu = 0.95$ (asfalt) får man 10 grader som övre gräns, och för $\mu = 0.35$ (packad snö) får man 4 grader som övre gräns.

ESP: Tillägg för hantering av förarbeteende

Man kan gå vidare och införa filtrering/fördröjningar innan man låter rattutslag slå igenom i börvärdena.

Man har också en dödzon på ΔM, dvs den måste vara större än en tröskel för att påverka bromsning av hjul. Det ska alltså inte hända hända något under normal körning. Detta sparar också bränsle eftersom något hjul i annat fall skulle småbromsa hela tiden.

ESP: Övergripande funktion

Vi har nu kommit igenom hela kedjan.

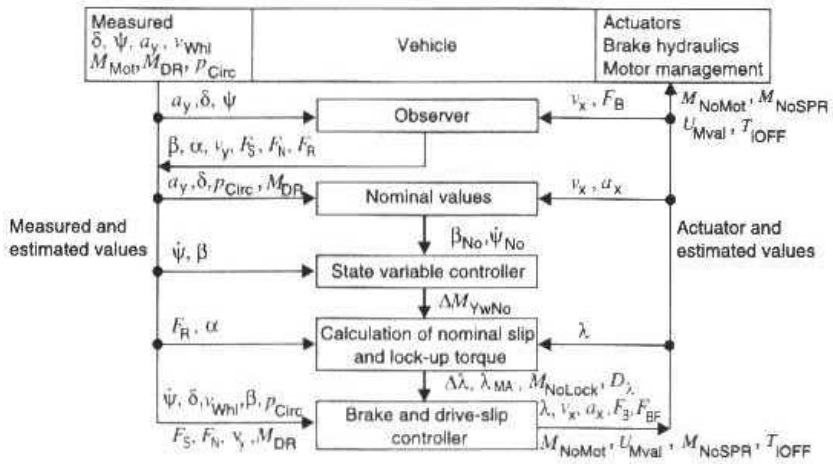
För att uppnå önskad funktion behöver man

- Beskriva bilens önskade beteende. Detta är inte trivialt eftersom det kräver en uppfattning om förarens önskan.
- Beskriva bilens aktuella beteende.
- Relatera till de sensorer och aktuatorer som finns, och till underliggande reglersystem.
- Ta hänsyn till förarens beteende i en pressad situation.
- Utforma ett styrsystem baserat på ovanstående.

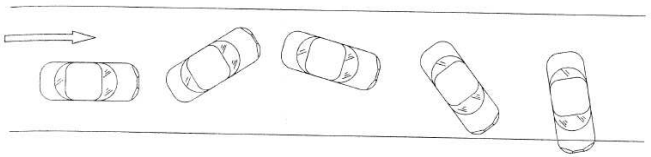
Titta nu än en gång på figur 5.22 i Wong.

Vi kan nu jämföra med en existerande produkt.

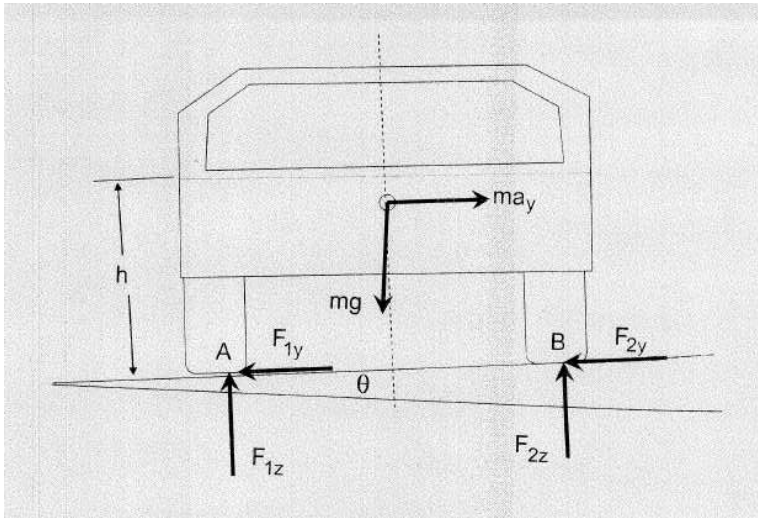
ESP: Exempel på produkt



Vältning: Scenario



Vältning: Analys



Vältning: Analys

När börjar bilen välta?

Momentjämvikt runt punkten B ger

$$F_{1z}d - mgh\theta - mg\frac{d}{2} + ma_y h = 0$$

Vid vältning är $F_{1z} = 0$ och antar vi att $\theta = 0$ får vi villkoret

$$\frac{a_y}{g} = \frac{d}{2h}$$

och vi kallar högerledet för *Static Stability Factor* (SSF)

$$SSF = \frac{d}{2h}$$

Om $\mu < SSF$ så kommer inte bilen att välta utan tappar istället greppet och glider i sidled.

Vältning: SSF

För en Volvo V70

$$SSF = \frac{d}{2h} = \frac{1520}{2 \cdot 550} = 1.38$$

Vältning

För mini SUVen Suzuki Jimny

$$SSF = \frac{d}{2h} = \frac{1354}{2 \cdot 700} = 0.95$$

Vältning

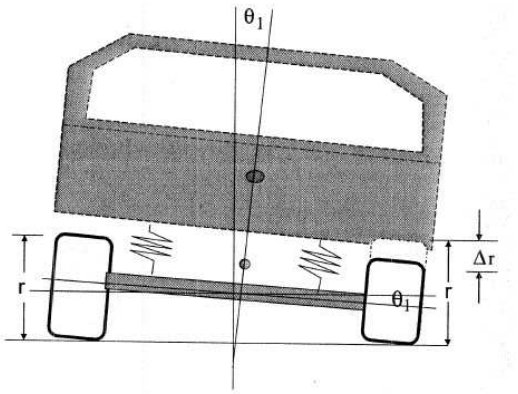
För en full tankbil

$$SSF = \frac{d}{2h} = \frac{2000}{2 \cdot 2200} = 0.45$$

Källa: *Vältning - en rent matematisk fråga*, Jonas Jarlmark, Vi Bilägare.

Vältning

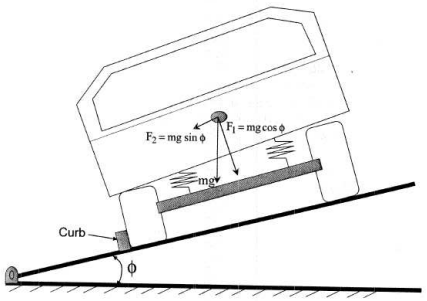
Eftersom vi får en lastförskjutning i lateral ledd så är SSF för optimistisk. För att få en mer realistisk uppskattning så måste elasticitet i däck och fjädrar tas med i modellen.



Vältning: Tilt Table Ratio (TTR)

Ett sätt att mäta hur stor lateral acceleration som krävs för att bilen skall välta är att ställa bilen på ett tiltbord och mäta vinkel när bilen välter

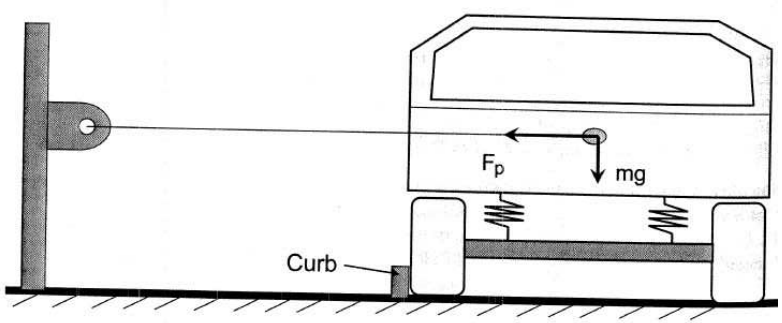
$$TTR = \frac{a_s}{g} = \tan \Phi$$



En felkälla är att normalkraften blir mindre än i verkligheten.

Vältning: Side Pull Ratio (SPR)

Alternativt sätt att uppskatta lateral acceleration vi vältning



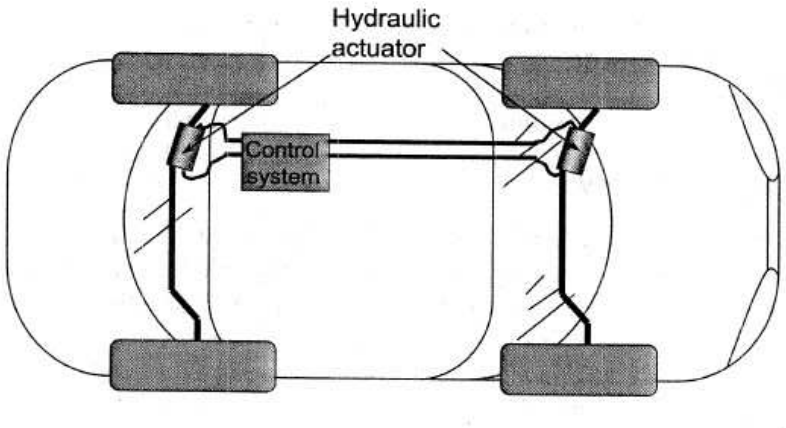
$$SPR = \frac{F_p}{mg}$$

Vältning: Åtgärder

Med aktiv fjädring kan risken för vältning minskas

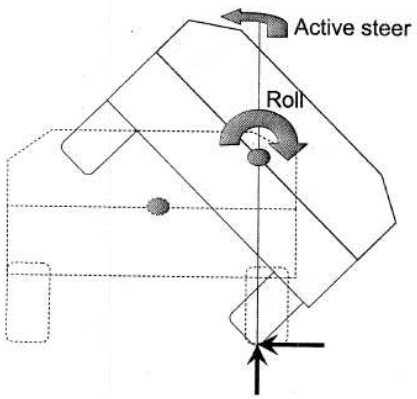
Vältning: Åtgärder

Ett annat alternativ är en (aktiv) krängningshämmare/sway bar



Vältning: Åtgärder

Ett sätt att undvika att bilen välter är att använda aktiv styrning och inbromsning



Källa: *Road Vehicle Dynamics*, R.V. Dukkipati et al