

Piloot wordt onderdeel van het besturingsontwerp

*Nieuwe
ontwerpregels
voorkomen slingeringen
door vliegenier*



DOOR PHILIP BROOS

Piloten op oude vliegtuigen, waarbij de stuurknuppel met staalkabels aan de roeren waren verbonden, hadden een directe terugkoppeling. Ze voelden de krachten die op de roeren kwamen te staan en dat betekende dat de piloten een goed contact hadden met hun toestel.

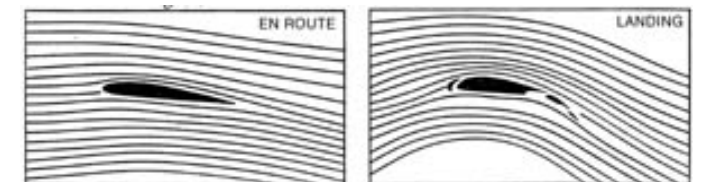
Modernere technieken brachten actuatoren in de vliegtuigen. De staalkabels zijn daarbij vervangen door elektrische kabels. De piloten verloren daardoor in eerste instantie de fysieke terugkoppeling, maar later kregen zij een kunstmatige terugkoppeling. Recenter is de zogenoemde fly-by-wire-techniek (FBW). Bij toestellen met deze techniek bestuurt de piloot het vliegtuig via computers. Dat geeft

Het nog brandende wrak van de Saab Gripen 39-102 die op 8 augustus 1993 tijdens de luchtvaartshow in Stockholm neestortte. De oorzaak van de ramp was een door de piloot opgewekte slingering (PIO).

(Foto: Katsuhito Tokunaga/SAAB AB, Linköping, Zweden)

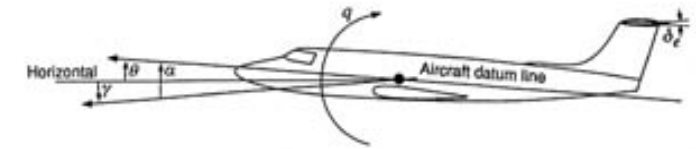


Tijdens het stijgen raakt deze Japanse straaljager in een door de piloot opgewekte oscillatie (PIO).



De luchtstroming om een vleugel: (boven) in een kruisvlucht en bij een hoge snelheid, (onder) tijdens de landing en dus bij lage snelheid.

een andere responsie (ander gedrag) van het toestel dan dat van conventionele vliegtuigen. Deze verandering leidde tot een opvallend groter aantal incidenten en ongelukken: de zogeheten Pilot Induced Oscillations (PIO) ofwel door de piloot veroorzaakte slingeren. Op basis van uitgebreid onderzoek, samen met vijftig jaar ervaring in de vliegtuigindustrie, ontwikkelde de Engelse promovendus John Gibson ontwerpregels voor FBW-vliegtuigen die niet alleen veel betere besturingsmogelijkheden bieden maar die ook voorkomen dat zich bij vliegtuigen überhaupt nog PIO voordoet. Bij de nieuwe Eurofighter - een co-productie van Engelse, Spaanse, Italiaanse en Duitse fabrikanten - zijn de nieuwe



Parameters voor de langsbeweging: langshelling (q), baanhoek (γ), invalshoek (α), hoogteroer-uitslag (δ_e), hoeksnelheid q om het zwaartepunt van het vliegtuig. De langshelling geeft de stand van het vliegtuig ten opzichte van de horizon. De baanhoek is de vliegrichting ten opzichte van de aarde en de invalshoek is de hoek waaronder de luchtstroom het vliegtuig treft.



Cockpit van de Starfighter F-104, een conventioneel jachtvliegtuig.

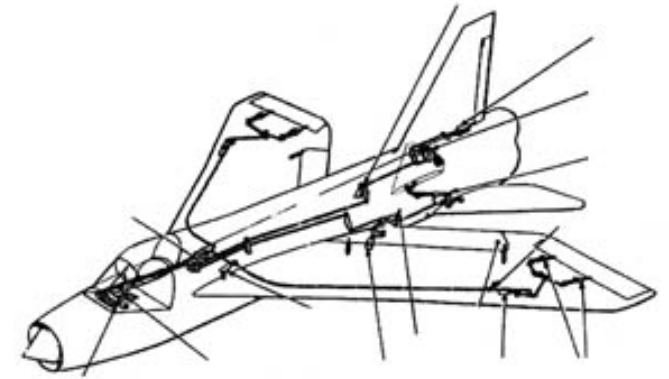
*ontwerpregels voor
besturing van Gibson
al toegepast. De
vliegtuigbouwkundige
promoveerde onlangs
bij prof. dr. ir. J.
A. Mulder van de
Delftse faculteit
Luchtvaart- en
Ruimtevaarttechniek.*

Zweden, enkele jaren geleden. Tijdens de luchtvaartshow in Stockholm in augustus 1993 toont Saab zijn nieuwste model straaljager, de Gripen. Het toestel wordt volledig bestuurd volgens het «fly-by-wire»-concept, maar het is instabiel ontworpen om een maximale wendbaarheid te krijgen. Op een bepaald moment zien de toeschouwers hoe het toestel een scherpe bocht maakt. De piloot probeert het vliegtuig weer recht te trekken. Dat lukt niet, omdat de besturingsapparatuur in snelheid achterblijft bij de besturingsopdrachten van de piloot. De vleugelkleppen aan de linkerkant staan nog helemaal uit. De piloot wordt daardoor gedwongen om te oversturen; een door hemzelf opgewekte slingering is het gevolg, waarbij het toestel van links naar rechts rolt.

De besturingsapparatuur werkt nu op het maximale vermogen en kan de hoogtebesturing van het toestel niet langer aan. Doordat het toestel zeer instabiel is in de hoogtebesturing koerst het vliegtuig stijl omhoog. De piloot realiseert zich dat hij de beheersing over het toestel kwijt is en stelt zich met z'n schietstoel in veiligheid. De straaljager is in een onbestuurbare situatie beland. De boordcomputer probeert nu de besturing van het toestel over te nemen. Om het vliegtuig uit de overtrekconditie [stall - red.] te laten komen, heeft de computer de roeren op de voorvleugel naar beneden gericht. Dat heeft echter geen succes, omdat het toestel plat naar beneden valt en geen voorwaartse beweging meer heeft. De Saab Gripen 39-102 stort in het zicht van een tienduizendkoppig publiek neer op een van de eilandjes van Stockholm. Het hele voorval duurt zo'n twaalf seconden. Als bij een wonder vallen er geen doden of gewonden.

Waterskiën

‘Om een vliegtuig horizontaal in de lucht te houden, heb je een bepaalde minimumsnelheid nodig en de juiste invalshoek, de hoek waaronder de stroming het vliegtuig treft’. De zeventigjarige promovendus John Campbell Gibson legt de basisprincipes van vliegen uit. ‘Hoe langzamer je vliegt hoe groter de invalshoek moet zijn.’



Voorbeeld van een gecompliceerd, geheel mechanisch besturingssysteem van de English Electric Lightning uit de jaren zestig. Het toestel kon tweemaal de lichtsnelheid vliegen.



Kabels en katrollen in het staartstuk van een conventioneel vliegtuig voor het besturen van de hoogte- en richtingsroeren.

Als zoon en kleinzoon van Anglikaanse missionarissen in China kwam Gibson in 1938 op negenjarige leeftijd naar Europa, waar hij na zijn middelbare school en dienstplicht bij de RAF in 1952 een baantje kreeg bij de English Electric Company. Dit bedrijf in Warton, niet ver van de badplaats Blackpool, heeft zijn sporen verdiend met de fabricage van de Canberra, Lightning, TSR-2, Tornado, Jaguar, FBW-Jaguar, eap en Eurofighter. Het bedrijf is in de loop der jaren overgenomen en nu onderdeel van British Aerospace. Gibson, nog steeds een actief zweefvlieger, heeft al bijna vijftig jaar interesse in besturingsaspecten, met name in de relatie piloot-vliegtuig.

‘Vliegen lijkt een beetje op waterskiën, hoe sneller je gaat hoe vlakker de ski op het water komt. Er is echter wel een verschil: een ski krijgt draagkracht door de waterdruk aan de onderkant, terwijl een vleugel aan zijn draagkracht komt door circulatie van lucht om de vleugel. Door zijn vorm ontstaat aan de onderkant van een vleugel een verlaging van luchtsnelheid en aan de bovenkant een verhoging van de luchtsnelheid. Die twee verschillende snelheden zorgen voor draagkracht. De draagkracht is meestal gelijk aan het gewicht van het toestel. Wanneer langzamer wordt gevlogen, is de circulatie rond de vleugel kleiner en moet de invalshoek van het toestel worden vergroot. Dat kan maar tot een bepaalde (minimale) snelheid, daarna helpt niets meer en valt een deel van de draagkracht weg en zou het toestel kunnen neerstorten. Bij het wegvallen van de draagkracht, het overtrekken, is slechts sprake van gedeeltelijk verlies van de draagkracht en niet van de gehele draagkracht, zoals vaak wordt gesteld’, zegt de wetenschapper, die wel eens een eind aan dat fabeltje wil maken.

‘Vliegtuigen horen zo te zijn gebouwd dat het verlies aan draagkracht zich altijd eerst voordoet direct naast de romp en dan naar buiten toe beweegt. Het is dan ook niet moeilijk om uit stall te komen. Bij een Boeing-747, bijvoorbeeld, is slechts een kleine neusduik voldoende om uit de stall-situatie te komen’, aldus Gibson.

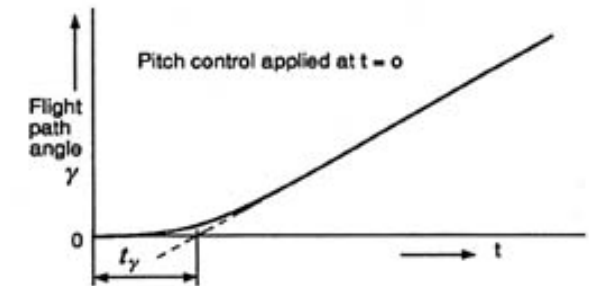
Zelftrimmend

Hoe groot de invloed van de aërodynamica op het gedrag van een vliegtuig is, legt Gibson uit aan de hand van de twee mechanismen.

‘Wanneer je de snelheid van een vliegtuig niet verhoogt maar wel de stuurknuppel naar achteren trekt, gaat het toestel eerst stijgen en dan langzamer vliegen. De invalshoek wordt namelijk groter en doordat de voortwaartse snelheid lager is geworden, heb je minder energie nodig - energie die weer wordt gebruikt om te stijgen. Wanneer je daarentegen het motorvermogen wel vergroot maar de knuppel niet aanraakt, wordt de draagkracht groter bij verhoogde snelheid terwijl de invalshoek gelijk blijft. Er is wel een klein overgangseffect in de vliegsnelheid. Door de grotere vliegsnelheid neemt de draagkracht toe, de baanhoek wordt



Hydraulische actuatoren van de roeren in het staartstuk van een Lockheed F-104 Starfighter.



Respons van het vliegtuig op de actie van de piloot. Het baanverloop is weergegeven als functie van de tijd na een hoogteroeruitslag omhoog. T_g is een maat voor de snelheid van de responsie van het vliegtuig.

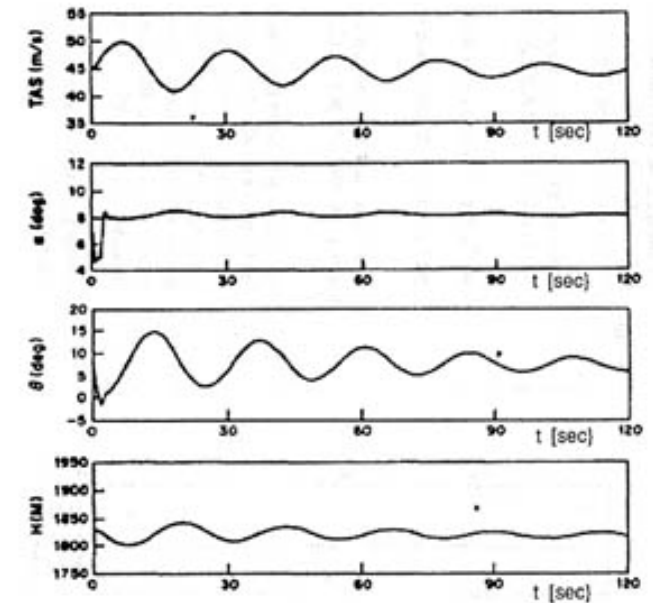
vergroot, het vliegtuig gaat stijgen en komt op den duur weer terug op de oorspronkelijke vliegsnelheid', aldus de promovendus. 'Een stabiel vliegtuig werkt zelftrimmend; na een verstoring komt het toestel vanzelf weer terug in zijn oorspronkelijke snelheid. Wanneer die te laag is, neemt de draagkracht af en gaat het toestel duiken. De snelheid neemt in de duikvlucht weer toe en daardoor ook de draagkracht weer. Wanneer de piloot niet ingrijpt, kan een oscillatie beginnen waarbij het toestel continu omhoog en omlaag beweegt.'

Deze mechanismen zijn van groot belang bij de stijgvlucht en de naderingsvlucht.

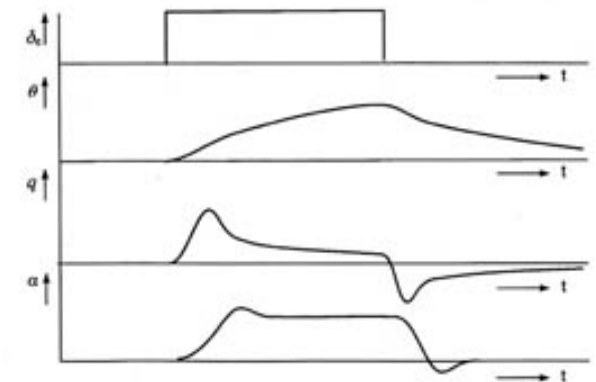
Lelijke Eend

Het ongeluk met de Gripen in Stockholm staat niet op zichzelf. Incidenten als gevolg van PIO komen regelmatig voor, zoals met het Amerikaanse spionagevliegtuig YF-22, de MD F/A-18 en het prototype van de NASA-Spaceshuttle. Meestal doen deze effecten zich voor bij het starten en landen, maar ze monden zelden uit in een fataal ongeluk. PIO is overigens een effect dat ook menig rijder van een Lelijke Eend of een Citroën DS zal hebben ervaren: bij een kuchende moter ontstaat er een interactie tussen de soepele vering (en de stoel) van de auto en de voet op het gaspedaal. De kuch leidt tot een heftige duik van de auto en het ongewenst intrappen van het gaspedaal, waardoor de auto weer sterk omhoog komt en weer duikt en het gaspedaal opnieuw ongewenst wordt ingedrukt enzovoort. De oscillatie kan alleen worden onderbroken door de voet van het pedaal te halen.

Gibson: 'Eigenlijk is het niet fair om te stellen dat de piloot van de Gripen de controle verloor, want bij een fly-by-wire-vliegtuig heeft de piloot sowieso al niet de controle die hij heeft in conventionele toestellen. Meestal denkt de piloot dat er een ander probleem speelt, omdat het toestel niet doet wat hij wil.' 'Vroeger waren er nauwelijks incidenten met PIO', vertelt Gibson, 'en als ze er waren, dan waren ze niet levensbedreigend. Dat kwam doordat de vliegtuigen anders waren gebouwd. Tot de jaren dertig waren ze gemaakt van hout of stalen buizen en doek. Later werden ze gebouwd van aluminium. De besturing bestond uit een hoofdvlugel met rolroeren aan de achterkant van de vleugel, een stabilo (horizontaal staartvlak) met hoogteroer en het verticale staartvlak met het richtingroer. De rolroeren aan de hoofdvlugel waren met kabels aan de stuurknuppel verbonden, evenals het hoogteroer. Het richtingroer was met kabels verbonden met twee pedalen. Door de directe verbinding van de knuppel en de pedalen aan de bewegende besturingsdelen, voelde de piloot heel exact de aerodynamische krachten die op de roeren werden uitgeoefend. De piloot ondervond veel terugkoppeling en dat gaf hem het gevoel het toestel te beheersen en zag hij het als een verlengstuk van zichzelf.'



Voorbeelden van verschillende oscillations:
Computersimulatie van het verloop van de vliegsnelheid (V), de invalshoek (α), de langshelling (q) en de vlieghoogte (H) na een uitslag van het hoogteroer van een De Havilland DHC-2 Beaver.



Proefondervindelijk

Na het eerste vliegtuig van de gebroeders Wright in 1903 duurde het veertig jaar voordat er een definitie voor de besturingseigenschappen voor vliegtuigen werd ontwikkeld, stelt Gibson. Het toestel, The Flyer, was heel moeilijk te besturen omdat het instabiel was. Ook veel van de vliegtuigen in de Eerste Wereldoorlog waren instabiel. Later werd theoretisch en vervolgens proefondervindelijk vastgesteld dat een vliegtuig instabiel zou zijn, wanneer het zwaartepunt te ver naar achteren lag. Lag echter het zwaartepunt te ver naar voren, dan was het moeilijk te landen en te manoeuvreren.

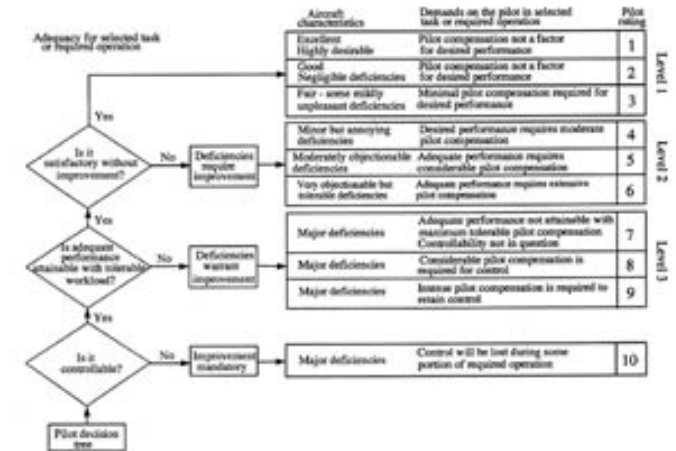
'De Douglas DC-2 uit de jaren dertig had een zak met zo'n 500 kilo zand in de staart om het zwaartepunt naar achteren te verplaatsen, het was te zwaar van voren', herinnert Gibson zich. 'Het Vampire-jachtvliegtuig uit de Tweede Wereldoorlog vloog vanwege de balans met 300 kilo ballast in de neus.' Aan het eind van de jaren dertig werden voor het eerst ontwerpregels gepubliceerd: door de Royal Aeronautical Society in Engeland. Gibson: 'Die waren gebaseerd op windtunnel-experimenten en praktische ervaring. Sommige theorieën waren ontwikkeld op het Royal Aeronautical Establishment in Farnborough en dateerden al van eind jaren twintig. Doordat ze geheim waren, wisten zelfs de ontwerpers van grote vliegtuigindustrieën er niet van.'

Gloster

Min of meer tegelijkertijd ontwikkelden de Engelsen en de Duitsers tegen het einde van de Tweede Wereldoorlog hun eerste vliegtuigen met straalmotoren, resp. de Gloster en de Me-262. De directe manier waarop deze toestellen konden worden gevlogen, was in grote lijnen gelijk aan de vorige generaties vliegtuigen. Door de hogere snelheden waren er echter wel problemen, zoals bij vliegen met snelheden dichtbij die van het geluid. De krachten die dan op de roeren kwamen, bleken zo groot dat de piloot de stuurknuppel alleen met veel inspanning kon bewegen. De volgende generatie straaljagers werd daarom met hydraulisch gestuurde actuators uitgerust: een stuurbevestiging.

Actuators waren al eerder toegepast bij uitzetten en intrekken van het onderstel en bij het bedienen van de vleugelkleppen. Het was vanaf het begin duidelijk dat het met actuators bestuurd mechanisme een kunstmatige terugkoppeling van de krachten op het toestel moest bieden aan de piloot. Er werden verschillende mechanismen gebruikt, van een voorgespannen veer tot hydraulisch opgewekte variabele krachten op de knuppel en de pedalen. Alles wat de piloot nog moest doen, was een gevoel ontwikkelen voor de kunstmatige krachten op de knuppel. Andere aspecten bij straalmotoren waren de grotere vlieghoogte en de hogere snelheden in ijlere lucht. De invloed daarvan op het vliegen was een minder goede

Generieke responses bij het landen met een conventioneel toestel: Responsie van de langshelling (q), de hoeksnelheid om de dwars-as (q) en de invalshoek (a), als gevolg van een blokvormige stuursignaal (de).



Vragenformulier uit de jaren zestig (type Cooper-Harper) waarmee de opinie van piloten over de besturingseigenschappen van een bepaald vliegtuig in kaart worden gebracht.

dynamica, slecht gedempte responsies en elastische trillingen van het vliegtuig als gevolg van roeruitslagen.

De vliegtuigontwerpers introduceerden daarop een kunstmatige damping van het toestel, via analoge computers. We spreken nu over eind jaren vijftig. Sensoren namen de beweging van het vliegtuig waar en via een analoog computersysteem werden de servo-actuatoren aangestuurd. Deze aanpak zorgde voor een betere damping in de beweging van het vliegtuig. De piloot had nog steeds direct voeling met dit toestel.

Er waren overigens ook nadelen aan de besturing van conventionele vliegtuigen: wrijving en speling in de lange staalkabels en de stuurknuppels. Dat maakte het moeilijker om heel precies te kunnen sturen. Er waren ook vaak problemen met de klepspeling van de hydraulische systemen die de servo-actuatoren aanstuurden.

25 Jaar

Het duurde nog eens 25 jaar voor er een goede definitie voor eisen aan de besturingseigenschappen voor straalvliegtuigen ontstond.

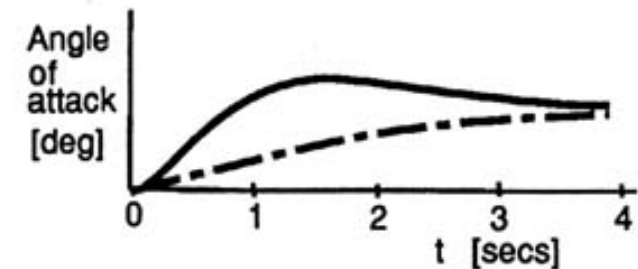
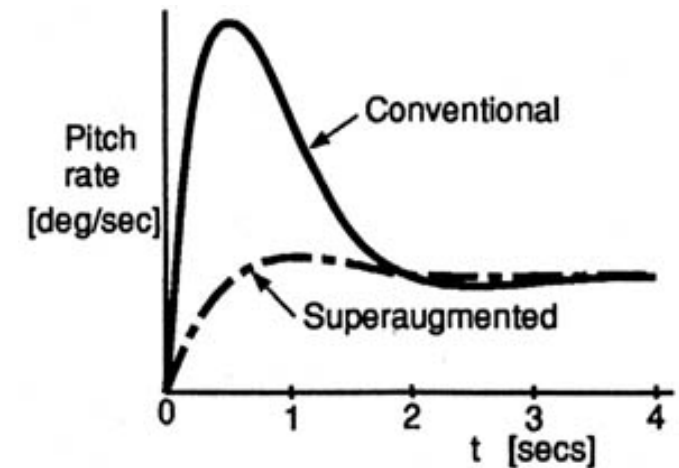
Waarom duurde het ook deze keer zo lang voor deze definitie er was?

'Vanwege de potentiële gevaren die veranderingen aan vliegtuigen met zich meebrengen, worden er in de vliegtuigindustrie altijd veel experimenten gedaan: simulatie, vliegproeven, beproeving op de grond en windtunnelproeven. Deze proeven vonden meestal in de Verenigde Staten plaats', legt de promovendus uit. 'Er is ook altijd onenigheid binnen de luchtvaartindustrie over de interpretatie van de definitie en over welke criteria en specificaties moeten worden aangehouden. Het duurt lang voor alles op papier staat en nog langer voor alles is goedgekeurd. Vijfentwintig jaar is een lange tijd om ontwerpcriteria op te stellen, dat klopt, maar het is een stuk sneller dan de veertig jaar die nodig waren om de eerste criteria op papier te krijgen. De eerste ontwerpcriteria waren voornamelijk gebaseerd op ervaringen in de Tweede Wereldoorlog. Helaas veranderden de vliegtuigontwerpen drastisch, dus je had niets aan die ervaring. Aanvankelijk waren er ook geen aparte ontwerpcriteria voor de bestuurbaarheid van de fly-by-wire-vliegtuigen, want iedereen ging er vanuit dat ze hetzelfde zouden zijn als die voor de vorige generatie.'

Elektrische verbindingen

Maar zo eenvoudig bleek het niet. De besturingseigenschappen van een FBW-toestel zijn eigenlijk helemaal onafhankelijk geworden van het fysieke toestel. Dergelijke toestellen zijn net als de vorige generatie vliegtuigen kunstmatig gestabiliseerd en kunstmatig gedempt met actuatoren, maar nieuw is dat de stuursignalen van de piloot naar de computer gaan, in plaats van naar de roeren.

Er is geen directe mechanische verbinding meer tussen de piloot en de roeren, dus



Verschillen tussen de responsie tussen de hoeksnelheid van om dwars-as (links) en de invalhoek (rechts) voor een conventioneel vliegtuig en een FBW-vliegtuig.

kan er ook geen sprake meer zijn van een mechanische terugkoppeling. Alles is nu uitgevoerd met elektrische verbindingen. De voordelen van FBW zijn, bijvoorbeeld, beveiliging tegen overbelasting en beveiliging tegen overtrekken; de vliegeigenschappen kunnen bijna onafhankelijk van de hoogte en de snelheid worden gemaakt. Het is zelfs mogelijk om een vliegtuig de eigenschappen te geven van een ander toestel. De Airbus 330 en Airbus 340 zijn verschillende ontwerpen met wel dezelfde cockpit-layout en vrijwel dezelfde instrumentatie. De computer zorgt ervoor dat de besturingseigenschappen van beide toestellen vrijwel gelijk zijn. Een piloot kan dus zonder meer van het ene type overstappen op het andere.

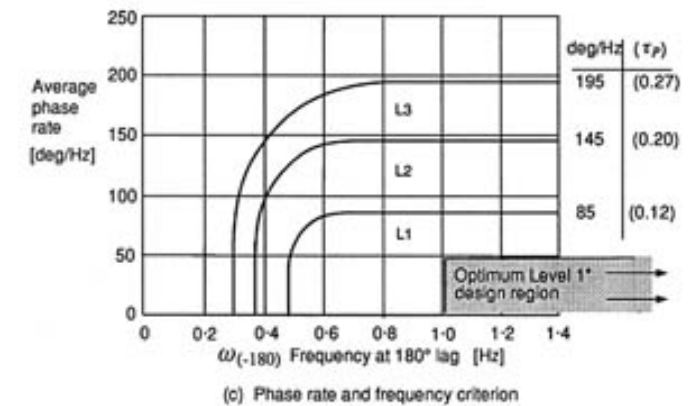
Draadje

De dynamica van conventionele vliegtuigen werd gedomineerd door aërodynamische eigenschappen zoals variaties in draagkracht, het moment om de dwars-as, bewegingen rond het zwaartepunt en traagheidseigenschappen. De dynamica van FBW-toestellen, daarentegen, wordt grotendeels bepaald door de eigenschappen van het automatische besturingssysteem.

Gibson: 'Dat betekent dat een ontwerper van regelwetten het vliegtuig vertelt hoe het zich moet gedragen, terwijl het toestel zelf ook een eigen gedrag heeft. Dat is de werkelijke reden dat FBW-vliegtuigen PIO vertonen en niet omdat ze met een elektrisch draadje worden bestuurd.'

Op 26 januari 1976 verongelukte in Italië een Britse Tornado als gevolg van PIO. Die gebeurtenis was voor Gibson de aanleiding om iets uit te zoeken dat al jaren door z'n hoofd speelde, namelijk wat er verkeerd was aan de besturingseigenschappen voor straaljagers en met name voor FBW-typen. Hij begon systematisch alle data op het gebied van besturingseigenschappen vanaf de jaren vijftig door te werken. Het ging om vakbladen, wetenschappelijke publicaties en nasa-publicaties. Die publicaties bevatten interviews met de piloten, waarin hun opinies en reacties op de besturing van de vliegtuigen zeer gedetailleerd waren weergegeven. Volgens Gibson had nooit iemand op een dergelijke, systematische, wijze naar deze gegevens gekeken.

'Ik probeerde een relatie te leggen tussen wat de piloot waarneemt wanneer hij vliegt, zoals de langshelling en de hoeksnelheid. Ik lette vooral op de details van de responsie. In een conventioneel vliegtuig stuurt de piloot de baanhoek indirect door de langshelling. In een FBW-toestel bestuurt de piloot de langshelling of de draaisnelheid om de dwars-as direct via een computer, en is de verandering van de baanhoek het gevolg van die actie. Het gevolg van dat subtiele verschil tussen die twee typen vliegtuigen is vaak een conventionele baanhoekresponsie van FBW-toestellen. De primaire «cue» die een piloot gebruikt om het vliegtuig te besturen, komt echter nog steeds van de langshelling, ofwel van datgene wat hij visueel kan



Gibson's parametrisch diagram met combinaties van vliegtuig-responsieparameters voor het uitsluiten van PIO. L1 = Geen PIO, L2 en L3 = Matige PIO, daarbuiten = Hevige PIO



Prototype van FBW-cockpit van de nasa.

waarnemen. De elementen van dit gedrag waren nooit goed begrepen. Ik realiseerde me dat de relatie tussen de responsie van de langshelling en baanhoek cruciaal was.'

Op basis van dit gegeven ontwikkelde hij ontwerpregels die vanaf 1982 in de luchtindustrie bekend zouden worden als de Early Gibson Criteria.

'Het waren richtlijnen voor de ontwerpers van regelwetten', legt Gibson uit. 'Waar het op neer kwam, is dat de regelwetten een zodanige responsie van het toestel moeten opleveren, dat de piloot er tevreden mee is. De piloot is de enige die weet of de besturingseigenschappen goed zijn. Het klinkt niet erg wetenschappelijk, dat klopt, want het is een zeer empirisch proces. Vroeger was de enige manier om er achter te komen of het ontwerp klopte door een vliegtuig te bouwen en te kijken wat de piloot zei, waarna het toestel moest worden aangepast. Nu kun je zeggen: programmeer het vliegtuig maar opnieuw en kijk wat de piloot er dan van vindt.'

Uitbannen

In 1994 publiceerde Gibson tenslotte ook nog PIO-criteria in de vorm van een parametrisch diagram. Het diagram vormt een belangrijke richtlijn voor ontwerpers van regelwetten. De richtlijn is in grote lijnen opgenomen in de specificaties van de Amerikaanse luchtmacht om dit soort PIO uit te bannen. Concreet kwamen zijn aanbevelingen erop neer dat de ontwerpers van de regelwetten beperkingen moeten aanbrengen op de verschillende elementen van de responsie, zoals die van de baanhoek, de langshelling, de rotatie en de rotatiesnelheid rond de dwars-as en de rotatieversnelling rond de dwars-as. Zijn richtlijnen zijn inmiddels met goed gevolg getest en toegepast op een aantal FBW-toestellen: de Tornado, de FBW-Jaguar en de Eurofighter.

*Voor nadere
informatie over dit
onderwerp kunt u
contact opnemen met
Dr. J.C. Gibson,
e-mail*

[jcgibson@argonet.co.](mailto:jcgibson@argonet.co.uk)

[uk](#) of met

*Prof.Dr.Ir. J.
Mulder,
tel. (015) 278
5378,
e-mail*

j.a.mulder@lr.

[tudelft.nl](mailto:vdvaart@lr.tudelft.nl), of met

Dr.Ir.J.C. van der

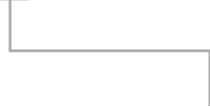
Vaart,

tel. (015) 278

5376,

e-mail [c.j.](mailto:c.j.vdvaart@lr.tudelft.nl)

vdvaart@lr.tudelft.nl



Za P P W aR K