

Samenvatting

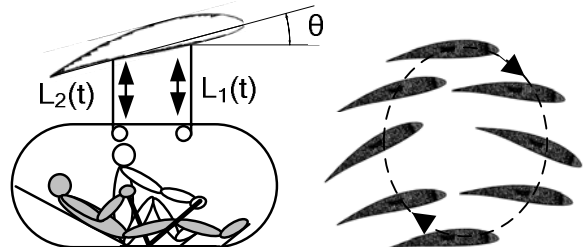
Onderzocht is of een door mensaangedreven roeivliegtuig, waarbij de vleugel een *plunging* en *pitching* beweging maakt, op hoogte en snelheid kan blijven. Hierbij zijn windtunneltesten uitgevoerd. Het onderzoek wijst uit dat er geen netto voortstuwing wordt gegenereerd en de vleugelbewegingen snel ongecontroleerd raken. Om eenduidig vast te stellen of het concept in de praktijk toepasbaar is, is vervolgonderzoek nodig.

Terminologie:

U [m/s]	Snelheid vliegtuig
f [Hz]	Roeifrequentie
a [m]	Slagamplitude vleugel
c [m]	Koordlengte vleugel
$L_{0,i}$ [m]	Evenwichtsstand van $L_1(t)$ en $L_2(t)$
α_i [°]	Faseverschil tussen $L_1(t)$ en $L_2(t)$
$\Theta(t)$ [°]	Hoek van inval van de vleugel
k [-]	Gereduceerde frequentie ($k=2\pi f \cdot c/U$)
<i>Plunging</i>	Periodieke verticale translatie, zie fig 1b
<i>Pitching</i>	Periodieke rotatie, $\theta(t)$ zie fig. 1a,b

1. Inleiding

Bij vrijwel alle mensaangedreven vliegtuigen wordt de voortstuwing door middel van een propeller verkregen. De uitdaging is het vinden van een efficiëntere manier van aandrijven. Het onderzochte idee werkt met een *plunging* vleugel, waaronder de romp aan kabels hangt (Figuur 1a). De vleugel wordt aangedreven door een roeibeweging. Bij een roeislag worden de kabels naar binnen toe getrokken waardoor de vleugel een slag naar beneden maakt. Bij de rustslag komt de vleugel weer omhoog. Tijdens deze translaties verandert ook de hoek van inval (θ) van de vleugel (Figuur 1b).



Figuur 1 a) romp aan vleugel b) beweging van vleugel

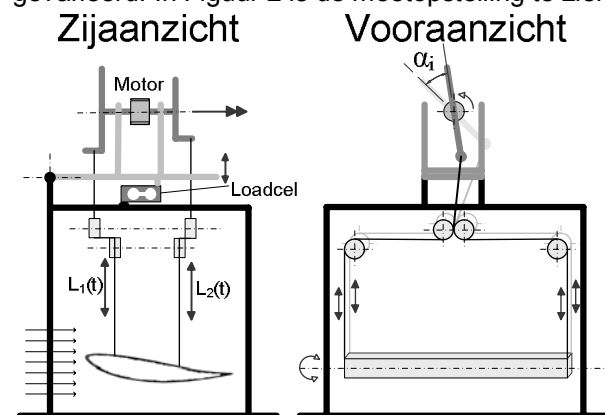
Dat bij een *plunging* vleugel liftkracht en netto voortstuwing kunnen worden gegenereerd is toe te schrijven aan het Knoller-Betz effect. Het Knoller-Betz effect houdt in dat een *plunging* vleugel een stuwkracht genereert. Deze stuwkracht kan groter worden dan de drag van de vleugel. Dit effect wordt versterkt door de beweging te combineren met *pitching*¹⁾. Omdat dit concept het eerste is dat voortstuwing en liftkracht uit één en dezelfde vleugel haalt (op human-powered schaal) en er ook nog geen onderzoek naar is gedaan, is er een exploratief onderzoek uitgevoerd. Wanneer men uitgaat van een piloot van 70kg en een vleugel en constructie van samen 30kg, dan is de benodigde liftkracht ongeveer 1000N. De netto voortstuwkracht moet voldoende zijn om de drag van de romp te compenseren. Dit is ongeveer $\frac{1}{2} \rho \cdot U^2 \cdot A \cdot C_{d,romp} \approx 20N$, aangenomen dat $A \approx 1.8m^2$, $C_{d,romp} \approx 0.3$ en een snelheid van 7 tot 8 m/s reëel is

voor een mensaangedreven vliegtuig. Dit levert een $F_{thrust} \cdot F_{lift} = 2/100$. Als randvoorwaarde hierbij geldt dat er maximaal 250W vermogen beschikbaar is (dit is nog haalbaar voor een getraind persoon).

2. Methode

Om eerst tot ordegrottes van de parameters te komen is een bestaande simulatietool³⁾ aangepast. Hierin ligt de beweging van de vleugel vast en volgen de krachten als resultaat. De benodigde krachten blijken bij grote invalshoeken (θ van -15° tot 30°) en vermogens (500W) te worden gehaald.

In werkelijkheid ligt de baan van de vleugel niet vast. Er is alleen sprake van opgelegde kabellengtes: $L_i(t) = L_{0,i} + a \cdot \cos(2\pi f \cdot t - \alpha_i)$, $i=1,2$ (fig.1a en 2). Θ is nu afhankelijk van $L_{0,i}$ en α_i , met frequentie f . Om in het onderzoek zo veel mogelijk optredende verschijnselen te kunnen waarnemen, is ervoor gekozen om in de meetopstelling dezelfde vleugelophanging te gebruiken als in het concept. De vleugel is ondersteboven opgehangen voor eenvoud en stabiliteit tijdens de metingen. De vleugel is aan vier kabels bevestigd. De kabellengte wordt opgelegd door roterende armen. Deze aandrijving zorgt voor een sinusoidale variatie (maximale afwijking van 6%). De opstelling is zo ontworpen dat alle parameters kunnen worden gevarieerd. In Figuur 2 is de meetopstelling te zien.



Figuur 2 Meetopstelling

Het gebruikte vleugelprofiel (Selig 1020) is geoptimaliseerd voor flapperende vleugels^{1,3)}. Om de complexiteit beperkt te houden is er voor gekozen om de dynamica van de romp buiten beschouwing te laten. De uiteinden zijn buiten de windtunnel gehouden om randeffecten te minimaliseren. Hierdoor is een 2-D analyse (ofwel een oneindig lange vleugel) mogelijk en mag de vleugel worden geschaald.

In de testopstelling is een loadcell opgenomen om de krachten te kunnen bepalen. Daarvoor moeten ook de vleugeleigenschappen, de kracht, de (optisch

bepaalde) hoek $\Theta(t)$ en de kabelhoeken bekend zijn. De bewegingen van de vleugel zijn gefilmd, omdat deze methode de beweging van de vleugel niet beïnvloedt. Een positief resultaat (netto voortstuwing) is zichtbaar aangezien de vleugel dan gemiddeld (in de tijd) tegen de wind in zal hangen. In deze gevallen zouden de liftkracht en voortstuwing bepaald worden (en hun coëfficiënten).

Schaling en variabelen

Bij het schalen is vooral de (dimensieloze) gereduceerde frequentie (k) van belang³⁾. Deze is daarom constant gehouden, opdat de optredende stromings-effecten ongewijzigd blijven. Andere dimensieloze parameters zoals het Reynoldsgetal (Re) zijn hier van ondergeschikt belang³⁾. De schaling en range van parameters is in Tabel 1 weergegeven.

	Fullscale	Scale
f [Hz]	0.7 – 1	0.4 – 2
c [m]	1 - 1.5	0.1
U [m/s]	7.5 – 10	1 - 5
a [m]	$0.5 \cdot c - 1.5 \cdot c$	$0.5 \cdot c - 1.5 \cdot c$
θ_{top} [°]	-15 – 15	-15 – 15
θ_{midden} [°]	-30 – 30	-30 – 30
k [-]	0.4 – 1.3	0.05 – 1.3
Re [-]	$5E5 - 10E5$	$6.7E3 - 3.3E4$

Tabel 1 Schaling meetopstelling

3. Resultaten

Tijdens de metingen is de vleugel niet zichtbaar tegen de wind in gaan hangen. Zichtbaar was wel dat de drag afnam bij toenemende frequenties; de vleugel ging dan minder achterlopen. Dit effect nam toe bij grote invalshoeken ($\theta > 10^\circ$), hoge frequenties ($f > 1\text{Hz}$) en grote flapamplitudes ($> 0.5 \cdot c$). Tegelijkertijd werd het systeem bij deze instellingen minder stabiel (grote en niet periodieke uitslagen van de vleugel), waardoor deze variatie begrensd was. In tabel 2 is een schematische samenvatting gegeven van de effecten bij toename van de onafhankelijke variabelen op de stabiliteit en voortstuwing.

Optisch is een gemiddelde van 0.5° achterlopen als meest positieve resultaat waargenomen. Dit is gemeten met een nauwkeurigheid van 0.3° (0.5mm op 100mm hoogte). Omdat er geen netto voortstuwing plaats vond, zijn er geen krachtmetingen uitgewerkt.

Een ander opvallend verschijnsel was het optreden van eigenfrequenties. Hierbij traden grote translaties op in beide horizontale richtingen. Dit verschijnsel deed zich voor onder bepaalde omstandigheden (afhankelijk van a , f , U en $\theta_{top/midden}$), maar verdween weer zodra de frequentie toe- of afnam.

Onafhankelijk (+)	Stabiliteit	Voortstuwing
U	--	--
a	-	++
f	-	++
θ_{top}	□	□
θ_{midden}	--	++

Tabel 2 Invloed van toename onafhankelijke variabelen

(-- = zeer negatief effect, ++ = zeer positief effect)

4. Discussie en conclusies

Op basis van de metingen kan worden geconcludeerd dat er geen configuratie van het schaalmodel is geweest waarbij er netto voortstuwing optrad. De verwachting is dat het Knoller-Betz effect niet zo sterk is opgetreden door de lage gereduceerde frequenties. Dit sluit aan bij de onderzoeksresultaten van Platzer en Jones²⁾. Het was niet mogelijk om bij hogere gereduceerde frequenties te meten omdat de vleugel daar instabiel werd door de hoge vrijheidsgraden.

Als tweede kan worden geconcludeerd dat de grote variatie in voortstuwing en liftkracht gedurende een periode zal zorgen voor grote schommelingen van de vleugel, hierdoor zal het vliegtuig instabiel worden.

De opgetreden eigenfrequenties kunnen worden vertaald (met een massa-slinger model) naar het full-scale model en blijken dan op ongeveer 0.6Hz te liggen. Omdat de roefrequentie ongeveer 0.7Hz is, kan dit grote problemen opleveren. De eigenfrequenties zijn te verschuiven door het gebruik van andere kabellengtes, maar ze blijven aanwezig.

De drie bovenstaande eigenschappen van het concept (te weinig voortstuwing, grote bewegingen en eigenfrequenties) zorgen ervoor dat het concept lastig haalbaar zal zijn. Meer onderzoek is echter nodig om dit met zekerheid vast te stellen.

5. Aanbevelingen

Voor vervolgonderzoek is de dynamica van het gehele systeem (met romp) een interessant onderwerp; beweegt de vleugel überhaupt wel ten opzichte van de lucht of beweegt alleen de romp? Is een extra vleugel aan de romp dan de oplossing?

Een ander aspect om te onderzoeken is het gebruik van een flexibel vleugelprofiel en/of een doorbuigende vleugel²⁾. Een hypothese hierbij luidt: "Het gebruik van een flexibele/doorbuigende vleugel leidt niet tot een thrust/lift-verhouding $> 2/100$ bij gereduceerde frequenties < 1.3 ".

Ten derde is het benutten van de eigenfrequenties voor de aandrijving een onderzoek waard.

Voor verdere experimenten raden we het gebruik van de watertunnel aan. De watertunnel heeft als voordeel dat bij hogere gereduceerde frequenties betrouwbaar gemeten kan worden en dat de inertia krachten verwaarloosbaar zijn. Ook is het mogelijk om de Reynoldsgedallen van de experimenten beter overeen te laten komen met de werkelijkheid, omdat water een hogere kinematische viscositeit heeft dan lucht.

Het advies aan de opdrachtgever is om de horizontale bewegingsvrijheid van de vleugel te beperken, zodat de schommelingen afnemen. Hiermee worden ook gelijk de gevolgen van eigenfrequenties ingeperkt.

Referenties

- 1) DeLaurier, "A study of mechanical flapping wing flight", The Aeronautical Journal, Oct. 1993.
- 2) M. Platzer, K. Jones, "Flapping wing aerodynamics - progress and challenges", AIAA Paper No. 2006-0500, Jan. 2006
- 3) Eerder onderzoek van 'The Project Ornithopter' (persoonlijk overlegd), zie www.ornithopter.ca