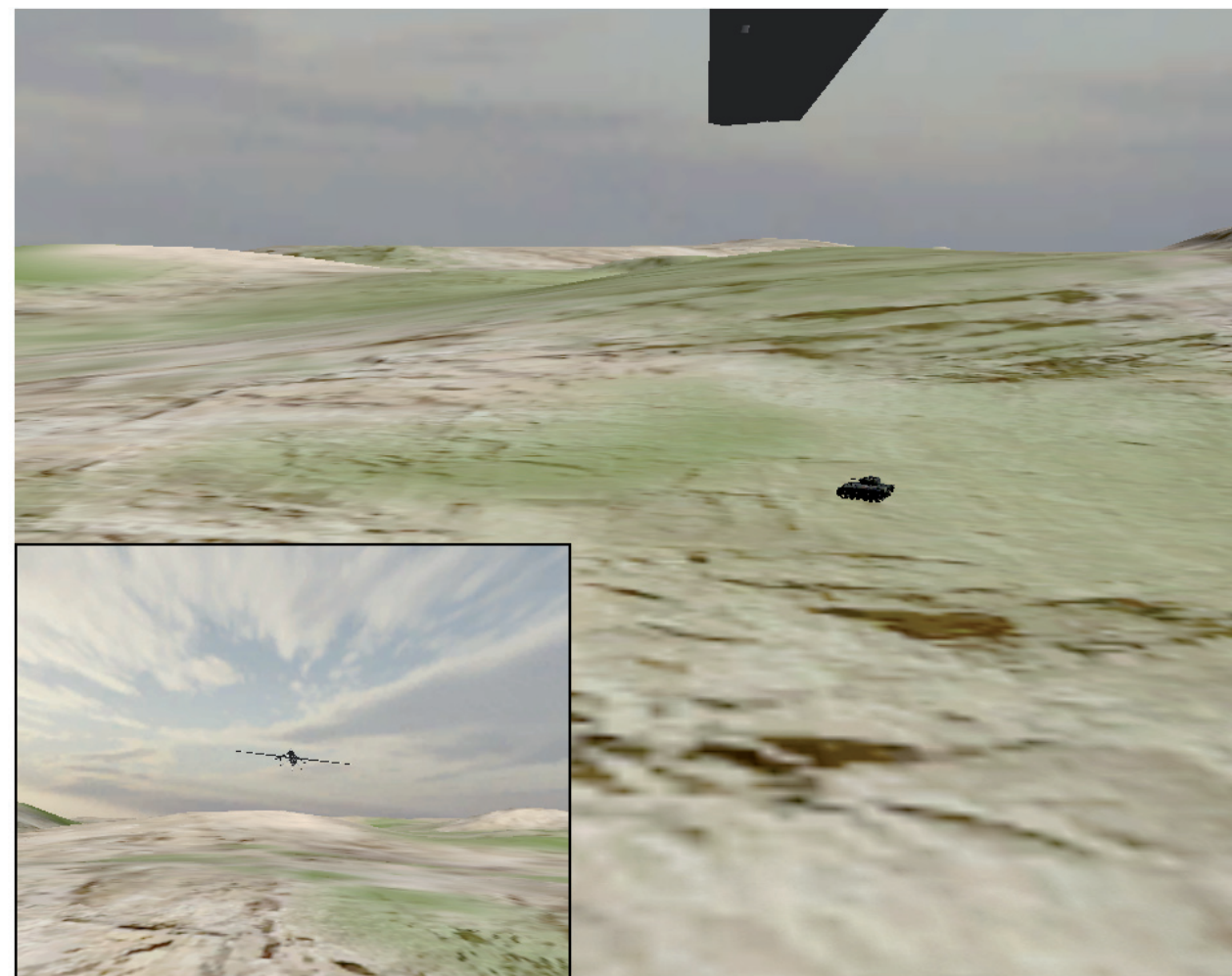


PETTER ÖGREN



FOI är en huvudsakligen uppdragsfinansierad myndighet under Försvarsdepartementet. Kärnverksamheten är forskning, metod- och teknikutveckling till nytta för försvar och säkerhet. Organisationen har cirka 1000 anställda varav ungefär 800 är forskare. Detta gör organisationen till Sveriges största forskningsinstitut. FOI ger kunderna tillgång till ledande expertis inom ett stort antal tillämpningsområden såsom säkerhetspolitiska studier och analyser inom försvar och säkerhet, bedömning av olika typer av hot, system för ledning och hantering av kriser, skydd mot och hantering av farliga ämnen, IT-säkerhet och nya sensorers möjligheter.

Petter Ögren

Metoder för UAV-spaning mot rörliga mål med fix kamera

Titel	Metoder för UAV-spaning mot rörliga mål med fix kamera
Title	Control Methods for Fix Camera UAVs Tracking Moving Targets

Rapportnr/Report no	FOI-R--3179--SE
Rapporttyp/Report Type	Användarrapport / User report
Sidor/Pages	20
Månad/Month	March
Utgivningsår/Year	2011

ISSN	ISSN-1650-1942
Kund/Customer	Försvarsmakten
Projektnr/Project no	E20675
Godkänd av/Approved by	Lars Höstbeck

FOI Totalförsvarets forskningsinstitut	FOI Swedish Defence Research Agency
Försvars- och säkerhetssystem	Defence and Security, Systems and Technology
164 90 STOCKHOLM	SE-164 90 STOCKHOLM

Sammanfattning

Denna rapport beskriver en metod för att följa rörliga mål med en mycket liten UAV, vars kamera är fast monterad och riktad i sidled. Monteringen innebär att stationära mål kan cirklas och därmed övervakas kontinuerligt från valfritt avstånd. Om målet rör sig blir det emellertid svårare att både behålla målet i bild och kontrollera avståndet till målet. En metod för att åstadkomma detta, och därmed förstärka spaningsförmågan för mycket små UAV:er, har utvecklats och beskrivs nedan ur ett användarperspektiv. Metoden går även att använda för att hantera fallet med spaning mot ett givet objekt i stark vind.

Nyckelord

UAV, spaning, styrning

Abstract

This document describes a control approach that enables small fix-camera UAVs to track moving targets, or, equivalently, to track stationary targets in strong winds. By using a side facing fixed camera, a small UAV can circle stationary targets, at some prescribed distance, while continuously keeping the target in view of the camera. However, if the target moves the two objectives, keeping the target in view and maintaining some prescribed target distance, can be conflicting. A control approach designed to achieve a tradeoff between these two objectives has been designed, and is described from a user perspective in this report.

Keywords

UAV, Surveillance, Control

Innehåll

1 Allmänna för- och nackdelar hos UAV:er med fix kamera	7
1.1 Fördelar med fixkamera-UAV:er	7
1.2 Nackdelar med fixkamera-UAV:er	7
1.2.1 Cirkelbanor runt stationära mål i svag vind	8
1.2.2 Flygbanor runt rörliga mål eller stationära mål i stark vind	8
2 Ny styrprincip för att mildra nackdelarna med fix-kamera UAV:er	11
2.1 Prioritering behövs för styrning med flera syften	11
2.2 Hur styrprincipen fungerar	11
2.3 Simuleringar med föreslagen styrprincip	12
2.3.1 Inverkan av upptäcksavstånd	13
2.3.2 Inverkan av begränsningar i kamerans synfält	13
3 Slutsats	17
Litteraturförteckning	19

1 Allmänna för- och nackdelar hos UAV:er med fix kamera

Små portabla UAV:er, t.ex. Falken-systemet¹, är mycket användbara för att skapa en god lägesbild, vilket i sig är viktigt för genomförandet av många av Försvarmaktens uppgifter, allt från förflyttning till väpnad strid. I detta kapitel skall vi beskriva allmänna för- och nackdelar med mycket små fixkamera-UAV:er, d.v.s. UAV:er där kameran inte är upphängd i en så kallad gimbal, som på Falken, utan sitter fixt monterad i flygkroppen. Först tittar vi på vilka fördelar en sådan design skulle ha, sedan betraktar vi nackdelarna.

1.1 Fördelar med fixkamera-UAV:er

Om kameran i en liten UAV monteras fixt, i stället för en gimbal-upphängning, så kan man få ett system med minskat luftmotstånd, reducerad vikt och ökad robusthet. Det civila lågpris-UAV-systemet SmartOne² är ett exempel på ett system med fix kamera.

Gimbalen utgör en väsentlig del av främst luftmotstånd, men även vikt, för mycket små UAV:er i storlekssegmentet under Falkensystemet. Eftersom kameran skall kunna rotera fritt har gimbalen ofta formen av en rund kupol, vilket ger ett stort bidrag till farkostens tvärsnittsarea och därmed dess luftmotstånd. Detta fenomen syns även på Falkensystemet, där gimbalen är dimensionerande för tvärsnittsarean hos den cylinder som hänger centralt under vingen. En mycket liten UAV utan gimbal skulle kunna ha sensorn inbyggd i kroppen eller vingen, riktad nedåt, eller snett nedåt sidan. I de fall då man vill täcka av en stor yta, passar en nedåtriktad kamera bäst, och när man vill ha många bilder av ett visst objekt från olika håll, passar en sidriktad bäst. Genom att ta bort gimbalen kommer man dessutom att reducera vikten på UAV:n, samt eliminera en möjlig felkälla.

Viktiga prestanda hos små UAV:er är bl.a. hur lätta de är att bära med sig, hur länge de kan vara i luften och hur bra kvalitén är på de sensorer de bär med sig. Vid konstruktionen av en UAV måste ofta dessa prestanda vägas emot varandra. En större sensor gör kanske att batteriet måste göras mindre, med minskad operationstid som följd, eller att vingarna måste göras större, med ökad systemvikt som följd. Detta gör att de förbättringar som nämns ovan istället kan realiseras som förbättringar i andra systemfunktioner, t.ex. operationstid eller systemstorlek.

SmartOne, som nämndes ovan, är främst avsedd att användas för att skapa en lägesbild inom skogsbruk och jordbruk, men även för att övervaka t.ex. skogsbränder. Den fixa kameran är därför riktad nedåt, och de resulterande bilderna behandlas digitalt så att de kan klistras ihop och bilda en stor kartlik mosaik.

1.2 Nackdelar med fixkamera-UAV:er

Nackdelen med att ta bort kamera-gimbalen är förstås att man nu måste vrida hela UAV:n för att rikta sensorn åt ett visst håll. Detta är särskilt problema-

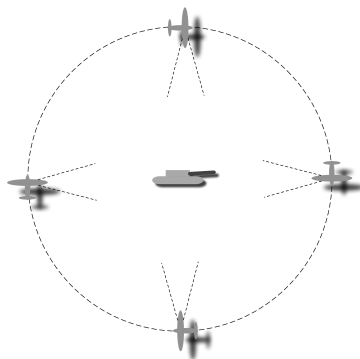
¹ Tillverkas av Israeliska Elbit (www.elbit.com) med produktnamnet Skylark I. Vingspann 2,9m, max startvikt 6,5kg.

²Tillverkas av Smartplanes AB (www.smartplanes.se). Vingspann 1,2m, max startvikt 1,1kg.

tiskt om man betraktar videoströmmen från kameran i realtid och vill kunna styra sensorn fram och tillbaka mellan olika objekt på marken. I vissa fall är emellertid realtidslänk inte ett alternativ. Antingen saknar systemet realtidsvideolänk helt, eller också är målområdet utom räckhåll för länken i fråga. Man kan också tänka sig fall då man vill iaktta radiotystnad för att inte avslöja sin närvaro på platsen. I fall då man inte vill eller behöver växla snabbt mellan olika spaningsobjekt kan en fix sensor räcka ganska långt. Vill man täcka av stora ytor med bilder uppifrån kan en sensor riktad rakt nedåt användas, och vill man kontinuerligt bevaka ett objekt eller en plats, kan en sid-riktad sensor användas i kombination med cirkelformade flygbanor. Om vinden eller målets rörelse är av samma storleksordning som UAV:ns hastighet, vilket ofta är fallet för små UAV:er, kan dock styrningen av UAV:n orsaka vissa problem. Dessa skall vi nedan analysera närmare.

1.2.1 Cirkelbanor runt stationära mål i svag vind

När man skall genomföra kontinuerlig spaning mot ett markmål från ett flygplan eller en UAV är det naturligt att flyga i cirkelbanor runt målet. Detta är följden av att man vill hålla sig på lagom avstånd från målet. Tillräckligt nära för att se det man vill, och tillräckligt långt bort för att inte synas själv, inte kunna nås av finkalibrig eld, eller helt enkelt slippa svänga alltför brant. En sådan cirkelbana illustreras i Figur 1.1.

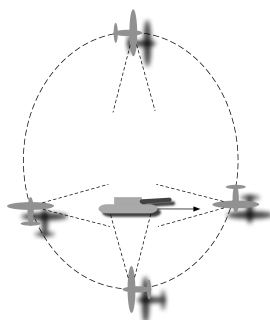


Figur 1.1: När ett stationärt mål skall bevakas väljer man ofta en cirkelbana på lämpligt avstånd från målet. Sensorn pekar då i samma riktning under hela momentet.

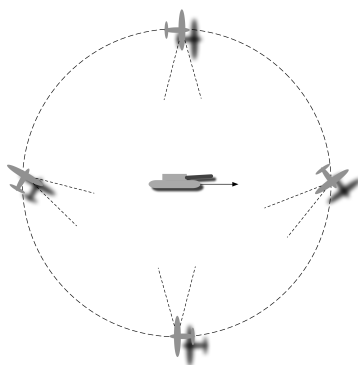
1.2.2 Flygbanor runt rörliga mål eller stationära mål i stark vind

Om målet rör sig, eller om det blåser kraftig vind, blir uppgiften för UAV:n något mer komplicerad. Dessa två fall är tekniskt väldigt lika, varför vi börjar med att resonera kring fallet med ett rörligt mål, och sedan tittar på vindfallet. Om kameran liksom ovan är fixt monterad, och riktad längs ena vingen, så kan man antingen fortsätta som ovan, och hela tiden peka kameran/vingen rakt mot målet. Om målet rör sig med en hastighet som inte är försumbar jämfört med UAV:ns, så kommer detta leda till ellipsformade flygbanor, så som illustreras i Figur 1.2. Exakt samma fenomen uppstår om målet står stilla och vinden istället är påtaglig jämfört med UAV hastigheten.

Om man istället fokuserar på att flyga på ett konstant avstånd från målet, kommer man tvingas kompensera för målrörelsen och därmed peka kameran lite vid sidan av målet, se Figur 1.3.



Figur 1.2: Om målet rör sig och kameran hela tiden riktas rakt emot målet kommer cirkeln från Figur 1.1 att förvandlas till en ellips. I figurens högra halva gör målrörelsen att avståndet mellan UAV och mål hela tiden minskar. I figurens vänstra halva är det tvärt om.

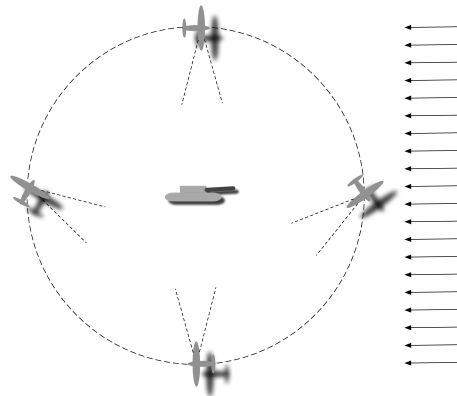


Figur 1.3: För att bibehålla ett konstant målavstånd kan UAV:n kompensera för målrörelsen genom att anpassa sin nosriktning något. Detta medför emellertid att kameran/vingen pekar vid sidan av målet när UAV:n passerar framför och bakom detsamma.

För att förstå varför dessa fenomen uppkommer tittar vi först närmare på Figur 1.2. I utgångsläget, när UAV:n är längst upp i figuren och flyger parallellt med målet är avståndet detsamma som i Figur 1.1. När så UAV:n svänger in framför målet, hela tiden med kameran riktad rakt emot målet, gör målets rörelse att UAV:n kommer att flyga en elliptisk bana och passera mycket närmare målet än i cirkelbanan i Figur 1.1. När UAV:n är längst ned i bild är den som närmast målet, och flyger i rakt motsatt riktning. Under den andra halvan av ellipsen gör målets rörelse att avståndet mellan mål och UAV hela tiden ökar, för att slutligen vara tillbaka där vi började.

Betrakta nu Figur 1.3. Om man vill att UAV:n skall hålla ett konstant avstånd till målet går detta att åstadkomma genom att ändra UAV:ns riktning, och därmed kompensera för målets rörelse. Detta är illustrerat i Figur 1.3. Som synes kommer UAV:n att peka lite mer bort från målet då den passerar framför detsamma, och lite mer emot målet då den passerar bakom. Detta gör emellertid att kameran, som pekar rakt åt sidan längs vingen, inte längre kommer att vara riktad rakt emot målet. Är nu målrörelsen tillräckligt stor, relativt UAV:ns hastighet och kamerans öppningsvinkel, så kommer målet att försvinna ut ur bild när UAV:n passerar framför och bakom målet.

I nästa kapitel skall vi beskriva en styrprincip som åstadkommer ett mellanfall mellan de två fallen i Figur 1.2 och 1.3. Men innan dess noterar vi att vi får precis samma fenomen i fallet då det blåser rejält, som vi hade med ett rörligt mål. I båda fallen rör sig målet relativt lufthavet där UAV:n befinner sig. I Figur 1.4 illustreras fallet då målets rörelse har ersatts med en vind med samma hastighet som målet hade, men med motsatt riktning.



Figur 1.4: I en situation där målet står stilla, men en stark vind blåser, så behövs exakt samma kompensationsmanöver av UAV:n som i Figur 1.3, om vinden blåser med samma hastighet men omvänd riktning jämfört med målet i Figur 1.3.

2 Ny styrprincip för att mildra nackdelarna med fix-kamera UAV:er

I förra kapitlet såg vi hur målrörelse, eller vind, kan ställa till problem för en UAV med fix kamera. Antingen håller man målet mitt i kamerabilden, och flyger ellips runt det, Figur 1.2, eller så flyger man cirklar, och låter målet röra sig i kamerabilden, Figur 1.3. Vi skall nu beskriva en ny styrprincip för att mildra problemen, och hitta en avvägning där man ser till att målet hela tiden befinner sig inom kamerabilden, men samtidigt håller sig så nära det önskade målavståndet som möjligt. Den nya styrprincipen beskrivs i detalj i artikeln *A Model Based Approach to Modular Multi-Objective Robot Control* [1] och en alternativ styrprincip med lite sämre prestanda finns i *Target Tracking in Wind using a Micro Air Vehicle with a fixed angle Camera* [2].

2.1 Prioritering behövs för styrning med flera syften

Problemet för UAV:n är att vi har två samtidiga syften: 1) hålla målobjektet i bild, d.v.s. hålla vinkeln mellan kamerariktningen och målriktningen mindre än ett visst värde, och 2) hålla avståndet mellan UAV och målobjekt nära något lämpligt värde. För att en automatisk styrning skall kunna hantera dessa två syften på ett rationellt sätt måste operatören klargöra hur han/hon prioriterar dem. I den föreslagna styrprincipen görs detta i form av en prioritetstabell, se Tabell 2.1. De två raderna i tabellen är kopplade till de två syftena, målvinkel och målavstånd, och kolumnerna beskriver olika prioritetsnivåer. I exempeltabellen är operatörens högsta prioritet (Prio 1) att UAV:n skall komma inom synhåll för målet (Målavstånd $\rho \leq \rho_{vis}$), innan detta är uppfyllt spelar det ingen roll hur stor målvinkeln är. Med andra ord ställs inga krav på målvinkeln på den högsta prioritetsnivån (Målvinkel $\eta \leq \infty$). Så fort UAV:n kommit inom synhåll för målet vill operatören emellertid få in det i kamerabilden. Prioritetsnivå två (Prio 2) blir därför (Målvinkel $\eta \leq \bar{\eta}$) där vi låter $\bar{\eta}$ vara lika med kamerans halva öppningsvinkel, samtidigt som kravet att vara inom synhåll ligger fast. Är så både målavstånd och målvinkel inom respektive gräns (Prio 2) så är operatörens tredje önskemål (Prio 3) att målavståndet skall ligga så nära något idealt spaningsavstånd (Målavstånd $\rho = \rho_0$) som möjligt, samtidigt som målet inte får försvinna ur bild.

2.2 Hur styrprincipen fungerar

Givet Tabell 2.1 skall vi nu beskriva hur styrprincipen fungerar. Först jämförs det aktuella läget med tabellen, och systemet avgör vilka prioritetsnivåer som är uppfyllda, och vilka som inte är det. Säg t.ex. att Prio 1 och 2 är uppfyllda,

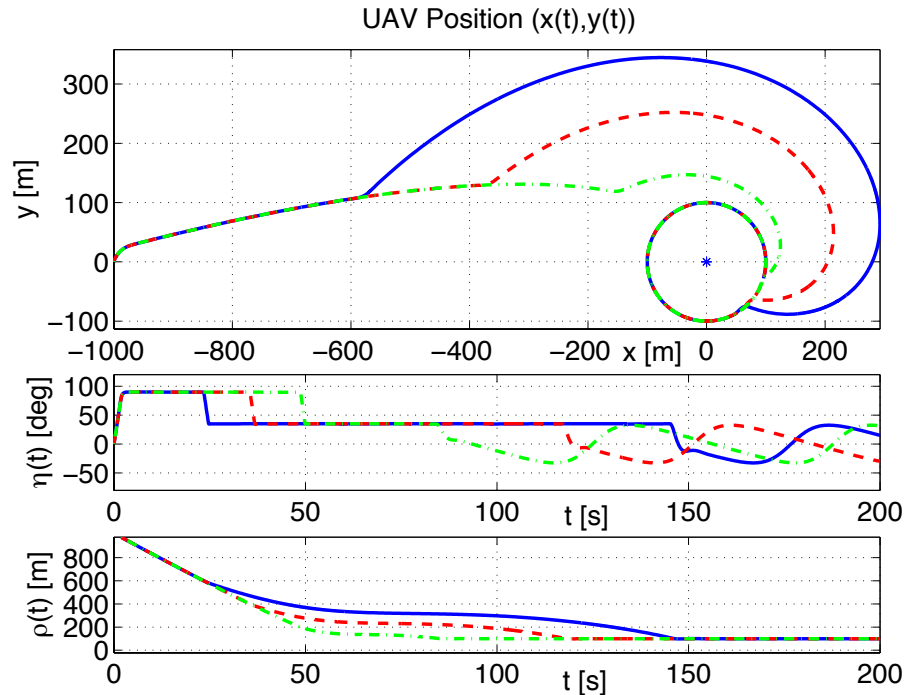
Prioritet:		1	2	3
Målvinkel	η	$\leq \infty$	$\leq \bar{\eta}$	$\leq \bar{\eta}$
Målavstånd	ρ	$\leq \rho_{vis}$	$\leq \rho_{vis}$	$= \rho_0$

Tabell 2.1: Den prioritetstabell där operatören anger de olika syftena och deras inbördes prioritet. Kolumn 1 är högsta prioritet och 3 är lägsta. $\bar{\eta}$ är halva kamerans öppningsvinkel, ρ_{vis} är bedömt upptäcktsavstånd och ρ_0 är idealt spaningsavstånd.

men inte Prio 3. Detta motsvarar att UAV:n är inom synhåll för målet ($\rho < \rho_{vis}$) och målet finns i kamerabilden ($\eta \leq \bar{\eta}$), men målavståndet är inte det ideala ($\rho > \rho_0$), ett sådant läge råder t.ex. under de spiralformade delarna av flygbanorna i Figur 2.1.

Målet för styrprincipen är nu att för det första se till att Prio 1 och 2 bibehålls, d.v.s. att UAV:n håller sig inom synhåll för målet och behåller det i kamerabilden, de förutsättningar som beskrivs i kolumn 1 och 2 i tabellen. För det andra är målet att dessutom uppfylla villkoren i kolumn 3, i det här fallet att målavståndet kommer ned till det önskade värdet.

Detaljerna för hur detta åstadkoms finns som beskrivits ovan i [1], men mycket kortfattat kan man säga att styralgoritmen hela tiden håller reda på hur långt från de redan uppfyllda gränserna systemet befinner sig, och om marginalerna är stora så läggs mycket vikt på att uppnå målen i nästa prioritetsskolumn, men om marginalerna är små så väljs bara styrkommandon som ser till att gränserna inte överskrids.



Figur 2.1: Tre UAV-flygningar med olika upptäcksavstånd $\rho_{vis} = 600m$ (heldragen, blå), $400m$ (streckad, röd) och $200m$ (prick-sträckad, grön). Målet är placerat i origo.

2.3 Simuleringar med föreslagen styrprincip

Nu skall vi i ett antal simuleringar se hur UAV:n beter sig med den föreslagna styrprincipen. I alla simuleringarna låter vi UAV-hastigheten vara 13 m/s, samma som SmartOne, vindhastigheten/målhastigheten vara 7 m/s, strax under s.k. styv bris, vindriktningen vara nordostlig, och det ideala målavståndet ρ_0 vara 100m.

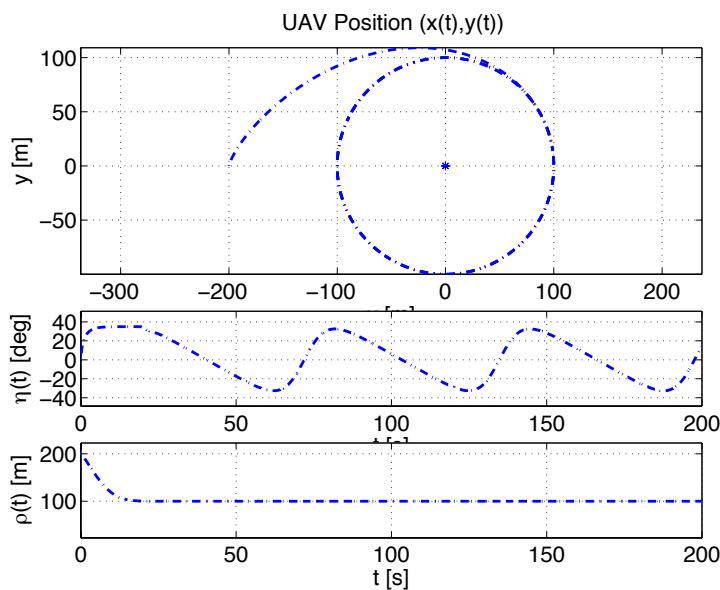
2.3.1 Inverkan av upptäcksavstånd

Först skall vi se hur olika val av upptäcksavstånd påverkar resultatet. I Figur 2.1 visas tre olika scenarion, med $\rho_{vis} = 600, 400$ och 200m . I alla tre fall startar UAV:n 1km rakt väster om målet och kamerans halva öppningsvinkeln är $\bar{\eta} = 35^\circ$. För att uppfylla det högst prioriterade syftet (Prio 1) i Tabell 2.1 flyger UAV:n först in mot målet. När upptäcksavståndet ρ_{vis} är uppnått svänger UAV:n brant åt vänster för att få in målet i bild (Prio 2), detta uppnås snabbt och nu är det återstående syftet (Prio 3) att få ned målasvståndet till $\rho_0 = 100\text{m}$, utan att förlora målet ur bild. I figuren kan vi se hur ett större valt upptäcksavståndet gör att UAV:n fortare uppfyller Prio 1 och 2, men sedan tar längre tid på sig att nå Prio 3, målavståndet 100m . Detta på grund av att den under en större del av inflygningen måste hålla målet i bild, och därmed tvingas flyga en spiralformad bana in mot detsamma. I den understa delen av figuren ser vi hur målavståndet ρ varierar. I den mittersta delen av figuren ser vi hur målvinkeln η startar nära 90 grader när UAV:n flyger in mot målet, sedan kommer under 35 grader för att få in målet i bild, och slutligen oscillerar upp och ned inom intervallet ± 35 grader. Oscillationerna beror på att UAV:n kompenserar med nosriktningen för att kunna ligga på en perfekt cirkelbana, så som illustrerades i Figur 1.3.

2.3.2 Inverkan av begränsningar i kamerans synfält

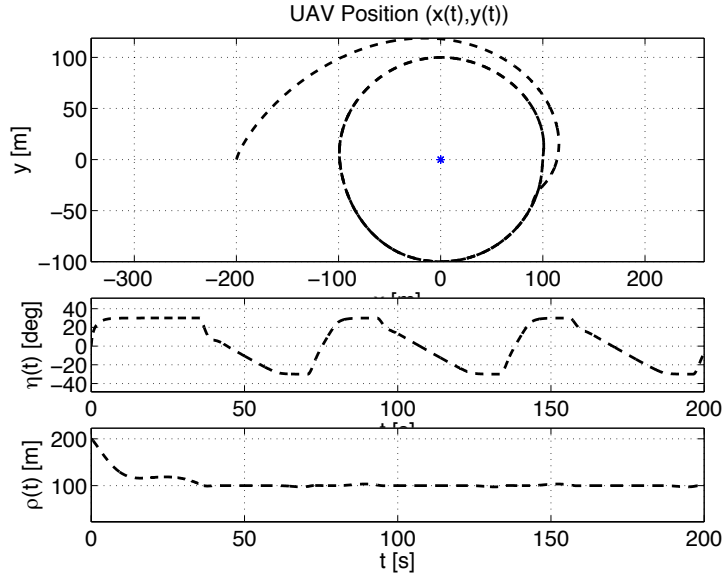
I nästa uppsättning simuleringar skall vi se hur olika val av kamerasyngfältsbegränsningar $\bar{\eta}$, påverkar UAV:ns flygbana. I dessa simuleringar startar vi 200m rakt väster om målet med både Prio 1 och Prio 2 uppfyllda.

Betrakta först Figur 2.2. Här låter vi $\bar{\eta} = 35^\circ$, samma som i Figur 2.1, och vi ser hur cirkeln nås, avståndet planar ut på $\rho = 100\text{m}$ och målvinkeln η oscillerar fram och tillbaka när UAV:n kompenserar för vinden.



Figur 2.2: En simulering med $\bar{\eta} = 35^\circ$. Notera hur flygbanan är en perfekt cirkel, målvinkeln η oscillerar mjukt och målavståndet ρ ligger stilla på 100m .

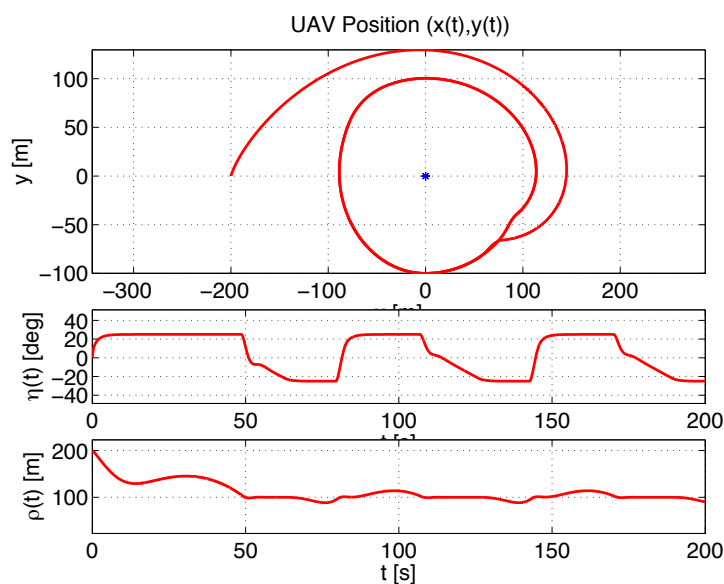
Låter vi $\bar{\eta} = 30^\circ$ blir resultatet lite mer spännande. I Figur 2.3 ser vi hur denna begränsning omöjliggör en exakt cirkel. Målavståndet ligger dock mycket nära 100m, och vi ser hur vinkelbegränsningen vid ± 30 plattar till målvinkelkurvan $\eta(t)$ som i Figur 2.2 var mjukt oscillerande.



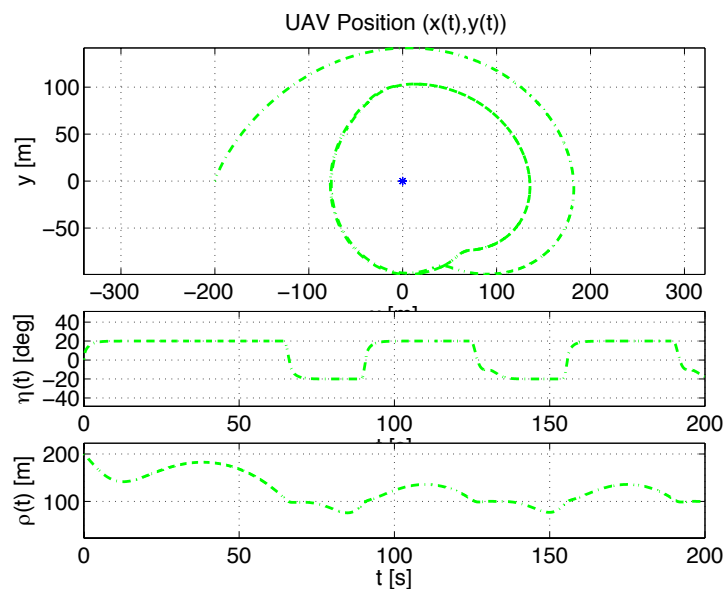
Figur 2.3: En simulering med $\bar{\eta} = 30^\circ$. Notera hur flygbanan är en lätt deformerad cirkel, oscillationerna i målvinkel är lätt tillplattade för att uppfylla $\pm 30^\circ$ begränsningen och målavståndet ρ avviker något från 100m.

Minskar vi $\bar{\eta}$ ytterligare, till 25° , blir cirkeln ännu mer deformerad, se Figur 2.4, och minskar vi ned till 20° , se Figur 2.5, så slår målvinkelkurvan $\eta(t)$ ganska snabbt mellan ändlägena $\pm 20^\circ$. Ju lägre vi sätter begränsningarna, desto längre tid tar det också för UAV:n att på sin spiralbana nå det önskade avståndet 100m.

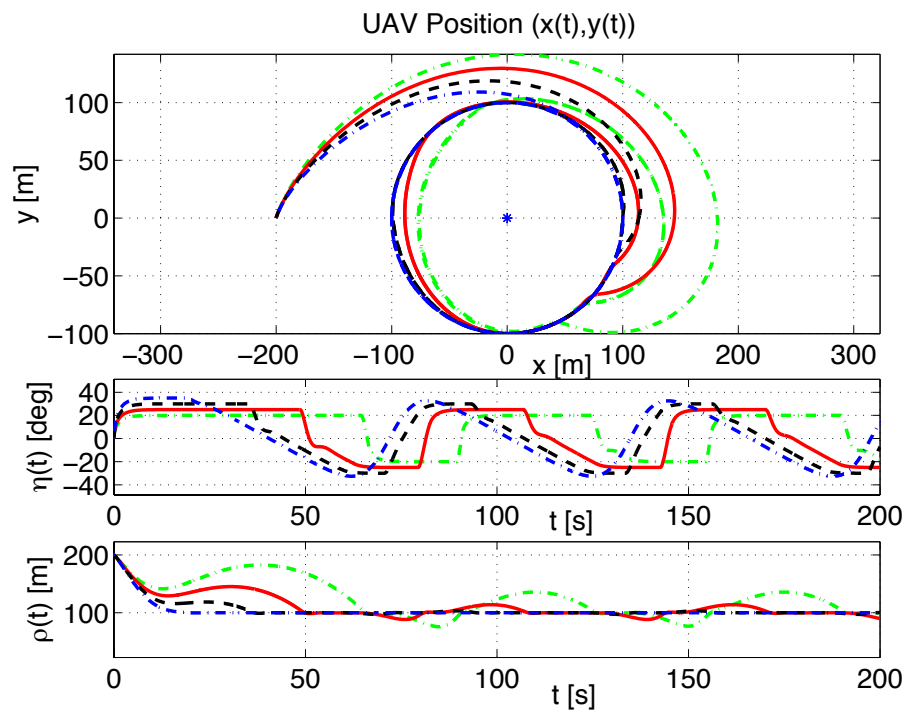
Slutligen, i Figur 2.6 har vi plottat alla simuleringar från Figur 2.2-2.5 i samma figur. Den stegvis minskande begränsningen i målvinkel är tydlig, liksom hur målavståndet avviker från de önskade 100m.



Figur 2.4: En simulering med $\bar{\eta} = 25^\circ$. Notera hur flygbanan är en deformerad cirkel, oscillationerna i målvinkel är rejält tillplattade för att uppfylla begränsningen på $\pm 25^\circ$ och målavståndet avviker rejält från 100m.



Figur 2.5: En simulering med $\bar{\eta} = 20^\circ$. Notera hur flygbanan är en rejält deformerad cirkel, målvinkeln skiftar snabbt mellan $\pm 20^\circ$ och målavståndet har börjat oscillera runt 100m.



Figur 2.6: Alla fyra simuleringarna från Figur 2.2-2.5. Begränsningarna på målvinkeln är $\bar{\eta} = 20^\circ$ (steck-prickad grön), 25° (heldragen röd), 30° (streckad svart), 35° (streck-prickad blå). De första och sista urskiljes genom att jämföra med Figur 2.2 och 2.5.

3 Slutsats

Genom att ta bort gimbalen på mycket små UAV:er kan man vinna systemprestanda i form av vikt, operationstid och systemstorlek. Nackdelen är dock att man förlorar flexibilitet, och måste vrida hela UAV:n för att rikta sensor. Flexibiliteten är förmodligen särskilt viktig i de fall då operatören styr UAV/sensor i realtid under uppdraget och vill kunna växla snabbt mellan olika mål på marken. I fallet när bara ett objekt är av intresse kan det dock vara motiverat med ett system utan gimbal. De nackdelar i flexibilitet som då uppkommer p.g.a. mål rörelser eller vind kan mildras med de metoder som beskrivs i denna rapport.

Litteraturförteckning

- [1] P. Ögren and J.W.C. Robinson. A Model Based Approach to Modular Multi-Objective Robot Control. *To appear in Journal of Intelligent & Robotic Systems*, pages 1–26, 2011.
- [2] J. Saunders and R. Beard. Tracking a target in wind using a micro air vehicle with a fixed angle camera. In *American Control Conference, 2008*, pages 3863–3868. IEEE, 2008.