

Sistem za vodenje letala na osnovi prediktivne regulacije in kratkoročnih trajektorij

Gregor DOLANC, Satja LUMBAR, Stanko STRMČNIK, Darko VREČKO, Drago MATKO

Izveček: V tem delu predstavljamo simulacijski prototip sistema za vodenje letala na osnovi prediktivne regulacije in kratkoročnih trajektorij. Sistem za vodenje, ki ga obravnavamo, je del širšega sistema za avtomatsko pristajanje letal, pri katerem ocena položaja letala in njegove orientacije poteka na osnovi sprotnega razpoznavanja in obdelave slik, posnetih iz letala med letom. Vodenje letala smo izvedli na osnovi prediktivne metode, ker je sposobna izboljšati kvaliteto vodenja na račun vnaprej dane referenčne trajektorije leta in do neke mere kompenzirati negativne vplive mrtvega časa in merilnega šuma, ki sta posledica numerične obdelave slike. Uvedli smo koncept kratkoročnih trajektorij, ki na osnovi trenutnega položaja letala in časovno neodvisne referenčne trajektorije leta tvori časovno sekvenco zelenih vrednosti za vodenje letala. Celoten sistem smo uspešno preizkusili v simulacijskem okolju.

Ključne besede: sistem za vodenje letala, prediktivno vodenje, kratkoročne trajektorije, vodenje na osnovi slikovnih značilik

■ 1 Uvod

V prispevku prikazujemo načrtovanje in preizkušanje simulacijskega prototipa za vodenje letala na osnovi prediktivne regulacijske metode, ki je bil razvit v okviru mednarodnega projekta PEGASE [1] iz 6. okvirnega programa. Projekt je koordiniralo podjetje Dassault Aviation. Sistem je del širšega sistema za avtomatsko pristajanje letala. Sistemi za avtomatsko pristajanje oziroma za pomoč pri pristajanju so v uporabi že relativno dolgo, vendar pa vsi slonijo na navigacijski opremi,

Dr. Gregor Dolanc, univ. dipl. inž., Satja Lumbar, univ. dipl. inž., prof. dr. Stanko Strmčnik, univ. dipl. inž., dr. Darko Vrečko, univ. dipl. inž.; vsi Institut Jožef Stefan, Ljubljana; Prof. dr. Drago Matko, univ. dipl. inž., Univerza v Ljubljani, Fakulteta za Elektrotehniko

ki ni locirana le na letalu, pač pa tudi izven letala, najpogosteje na letališču. Navigacija poteka s signali, ki jih oddaja navigacijska oprema izven letala in sprejema oprema na letalu. V redni uporabi je nekaj tovrstnih sistemov, najbolj pogost je t. i. ILS (angl. Instrument Landing System), ki sloni na navigacijski opremi na letališčih. Odvisnost tovrstnih sistemov od opreme izven letala je lahko slaba lastnost v smislu varnosti. Navigacijska oprema izven letala je namreč lahko predmet naključnih ali namernih okvar, kar bistveno zmanjšuje varnost. Odtod izvira tudi glavna motivacija projekta PEGASE, to je razviti nov, popolnoma avtonomen sistem za avtomatsko pristajanje, ki ne bo odvisen od zunanje opreme, pač pa le od opreme, ki je locirana na letalu samem. Tak sistem je potencialno uporaben kot rezerva obstoječim sistemom za avtomatsko pristajanje ali pa kot primarni pristajalni sistem na letališčih brez ustrezne

pristajalne navigacijske opreme. Ključna ideja projekta PEGASE je navigacija in vodenje letala s pomočjo strojnega vida, točneje s pomočjo sekvence slik, posnetih s slikovnimi senzorji, nameščenimi na letalu. Primerjava slik in modela okolja namreč omogoča oceno položaja in orientacije letala oziroma omogoča tudi neposredno vodenje letala brez neposredne ocene položaja in orientacije [2], [3], [4], [5]. Institut Jožef Stefan, Odsek za sisteme in vodenje, je bil eden od partnerjev projekta, zadolžen za razvoj regulacijskega sistema za sledenje trajektoriji leta.

Razvoj celotnega sistema je potekal v simulacijskem okolju. Vsi podsistemi so bili izvedeni v obliki programske opreme, ki je bila nato preko predpisanih vmesnikov integrirana v skupno simulacijsko okolje, ki je omogočilo funkcionalno preizkušanje celotnega sistema.

Uvodu sledi drugo poglavje, v katerem opisujemo strukturo celotnega sistema, funkcije posameznih podsistemov in simulacijsko okolje. Tretje poglavje je posvečeno razvoju sistema za sledenje poti, ki je naš glavni prispevek. Delovanje celotnega sistema v okviru simulacijskega okolja pa je prikazano v četrtem poglavju.

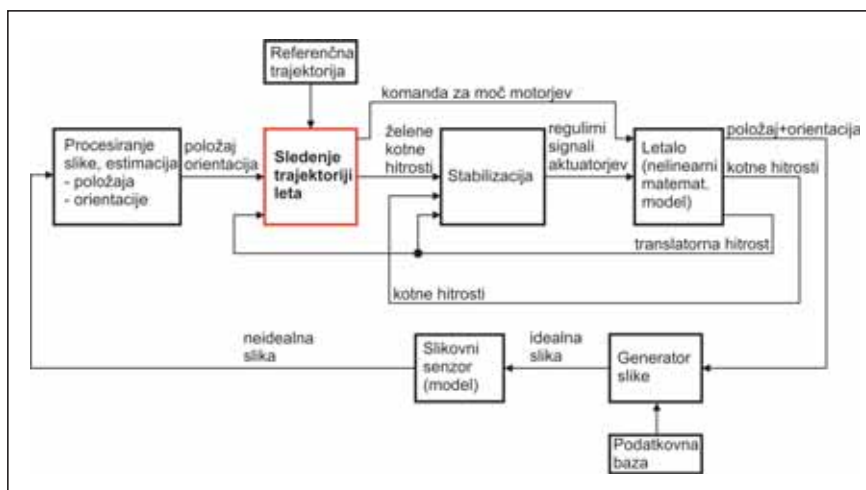
■ 2 Opis celotnega sistema in simulacijskega okolja

Slika 1 prikazuje sestavo celotnega sistema v simulacijskem okolju, kjer sta potekala ves razvoj in preizkušnje.

Simulacijsko okolje projekta PEGASE je omogočilo integracijo podsistemov, ki so jih s povsem različnimi programskimi orodji (Matlab, C++, itd.) razvili različni projektni partnerji. V simulacijskem okolju so bili izvedeni vsi elementi sistema: matematični model letala, generator slike, modeli slikovnih senzorjev, algoritmi za oceno pozicije in orientacije letala in algoritmi za vodenje trajektorije leta. Z rdečo barvo je označen del sistema, ki smo ga razvili avtorji tega prispevka. V nadaljevanju bomo na kratko opisali posamezne podsisteme.

2.1 Nelinearni matematični model letala

Nelinearni matematični model letala v okviru simulacijskega okolja nadomešča pravo letalo. Matematični model je množica nelinearnih dinamičnih in statičnih relacij, ki opisujejo dinamični odziv letala na spremembe vhodnih krmilnih signalov aktuatorjev in dinamični odziv na motnje, oboje v različnih obratovalnih pogojih. Glavni izhodi modela so položaj, orientacija, kotne ter translatorne hitrosti letala. Gre za izredno podroben in natančen matematični model, ki ga je v okolju Matlab Simulink razvil projektni partner Alenia Aeronautica. Notranja struktura modela (diferencialne enačbe, funkcijske odvisnosti in parametri) je bila sicer dostopna, vendar je pri načrtovanju sistema namenoma nismo uporabljali. Vsa interakcija z modelom je potekala podobno kot s pravim letalom, to je po principu



Slika 1. Sistem v simulacijskem okolju

"črne škatle", kar pomeni, da smo vse informacije za načrtovanje sistema pridobili eksperimentalno iz poteka vhodnih in izhodnih signalov modela. Vse načrtovalske postopke bi tako lahko izvedli tudi na osnovi krmilnih in merilnih signalov pravega letala.

2.2 Generator slike

Generator slike proizvaja sintetično sliko okolice, ki je v realnosti vidna z letala med letom oziroma med pristankom. Vhoda v generator slike sta položaj in orientacija letala, ki izvirata iz izhoda matematičnega modela letala. Generator slike vsebuje podatkovno bazo okolice, na podlagi katere se tvori sintetična slika, ki je idealna in nepopačena. Ta slika se nato uporablja kot vhod v modele slikovnih senzorjev.

2.3 Slikovni senzorji

Ena izmed ključnih komponent sistema so senzorji za zajem slike, ki morajo zagotoviti primerno kvaliteto slike v različnih vidljivostnih razmerah (dan, noč, sneg, dež, megla, okolica pokrita s snegom in podobno). V okviru projekta senzorjev nismo neposredno razvijali, pač pa smo skušali najti primerne obstoječe tehnološke rešitve. Na voljo je več obstoječih tehnologij, poleg klasičnih CCD-senzorjev, ki so uporabni bolj ali manj le v idealnih vremenskih razmerah, so na voljo magnetni senzorji, infrardeči senzorji, kot zelo obetavni pa so se izkazali zlasti laserski senzorji, ki delujejo v

širokem spektru vremenskih razmer. Za potrebe vključitve v simulacijsko okolje je bilo potrebno izdelati oziroma pridobiti matematične modele senzorjev. Matematični model slikovnega senzorja je matematična transformacija, ki idealno sliko okolice pretvori v realno, kakršno proizvaja realni senzor v določenih vidljivostnih razmerah.

2.4 Estimator položaja in orientacije letala

Ta podsistem služi za ocenjevanje položaja in orientacije letala na podlagi obdelave slike, ki jo tvori slikovni senzor. V našem primeru je slikovni senzor nameščen na letalu, slikovni objekt pa sta pristajalna steza in okolica. Estimacija položaja s slike je relativno kompleksen postopek s področja računalniškega vida in ga v tem članku ne bomo podrobneje obravnavali, razvili pa so ga drugi projektni partnerji. Rezultat postopka je bodisi položaj in orientacija letala glede na pristajalno stezo bodisi matematični opis značilik slike (robovi, oglišča, itd.) v koordinatnem sistemu kamere.

2.5 Sledenje trajektoriji leta

Podsistem za sledenje mora zagotoviti, da letalo sledi vnaprej predpisani referenčni trajektoriji leta in da je njegova hitrost enaka predpisani hitrosti. Na osnovi odstopanja dejanskega položaja letala in hitrosti sistem nastavi želene vrednosti kotnih hitrosti letala in moč motorjev. Ta sistem smo raz-

vili na Odseku za sisteme in vodenje na Institutu Jožef Stefan in ga bomo podrobneje opisali v nadaljevanju tega prispevka.

2.6 Stabilizacija letala

Podsistem za stabilizacijo je vmesni člen med sistemom za vodenje trajektorije in aktuatorji (smerno krmilo, višinsko krmilo, zakrilca). V splošnem tovrstni sistemi stabilizirajo nestabilna letala oziroma izboljšajo stabilnost stabilnih letal. Poleg tega odpravijo (linearizirajo) nelinearno učinkovanje aktuatorjev, tj. smernega in višinskega krmila ter zakrilc. S tem je olajšana izvedba sistema za vodenje trajektorije. Sistem za stabilizacijo v tem članku ne bo podrobneje obravnavan, saj so ga razvili drugi projektni partnerji.

■ 3 Sistem za sledenje trajektoriji leta

Sistem za slednje trajektoriji leta mora zagotoviti, da letalo sledi referenčni trajektoriji in da je njegova hitrost enaka predpisani. Vhod v sistem je referenčna trajektorija leta in dejanski položaj ter orientacija letala. Izhod iz sistema pa so zelene vrednosti (reference) za kotne hitrosti letala in pa krmilni signal za moč motorjev. Zelene vrednosti kotnih hitrosti predstavljajo vhodne signale v sistem za stabilizacijo letala (razdelek 2.6), krmilni signal moči motorjev pa učinkuje direktno na motorje, to je na model letala.

Referenčna trajektorija leta (RT) je vnaprej definirana z nizom točk:

$$RT = (WP(1), WP(2), \dots, WP(m)) \quad (1)$$

Pri tem so $WP(k)$ točke poti (angl. waypoints), opisane s prostorskimi koordinatami:

$$WP(k) = (x_k, y_k, z_k) \quad (2)$$

Sosednje točke so medsebojno povezane z ravnimi segmenti ter tako tvorijo predpisano pot. Za vsak segment med dvema sosednjima točkama $WP(k)$ in $WP(k+1)$ je predpisana hitrost $v(k)$ ter konfiguracija letala (položaj sekundarnih krmilnih površin ter podvozja).

Trenutni položaj in orientacija letala (angl. Pose) sta rezultat obdelave slike in predstavlja(ta) vhod (merjeno veličino) v sistem za vodenje trajektorije.

$$Pose = (P_A, O_A), P_A = (x_A, y_A, z_A), O_A = (Phi, Theta, Psi) \quad (3)$$

Pri tem pomenijo x_A, y_A, z_A koordinate položaja letala (P_A) v zemeljskem koordinatnem sistemu (x v smeri sever, y v smeri vzhod in z navpično). Za koordinatno izhodišče predpostavimo, da se nahaja na začetku pristajalne steze. $Phi, Theta, Psi$ pa so Eulerjevi koti, ki podajajo orientacijo letala (O_A) in so podrobneje definirani v nadaljevanju v tabeli 1.

Pri izvedbi sistema za sledenje trajektorije leta smo kot osnovo uporabili prediktivno regulacijsko metodo na osnovi modelov (MPC, angl. model based predictive control). Obstajajo trije razlogi za uporabo te metode. Prvi razlog je v dejstvu, da je referenčna trajektorija leta (RT) vnaprej znana. Prediktivna regulacijska metoda je sposobna upoštevati informacijo o prihodnjih zelenih vrednostih procesnih veličin in na ta račun izboljšati kvaliteto regulacije. Drugi razlog izhaja iz dejstva, da se položaj in orientacija letala ocenjujeta s slik, posnetih iz letala med samim letom. Sprotna računalniška obdelava slik lahko v merilne signale vnese zakasnitev (mrtvi čas) in različne tipe merilnega šuma. Oba pojava imata na regulacijo negativen vpliv, prediktivna metoda pa jih lahko do neke mere kompenzira. Tretji razlog pa predstavlja zmožnost prediktivne regulacije, da lahko pri iskanju optimalnih krmilnih signalov upošteva različne omejitve, ki lahko nastopijo pri vodenju letala.

3.1 Splošno o prediktivni metodi vodenja

Prediktivne metode uporabljajo optimizacijo za določitev trenutne in prihodnjih vrednosti reguliranih signalov (u_i). Cilj optimizacije je minimiziranje kriterijske funkcije (J), opisane z enačbo (4), upoštevajoč trenutno in prihodnje predpisane vrednosti izhodov procesa (r_i) in trenutno ter prihodnje dejanske vrednosti izhoda

procesa (y_i). Pri tem se prihodnje vrednosti izhoda procesa ocenijo z modelom procesa. Ostali parametri so: w_i – uteži regulacijske napake, w_{ii} – uteži spremembe krmilnih signalov, P – prediktivni horizont regulatorja in C – kontrolni horizont regulatorja. Podrobnejši opis metode najdemo v literaturi, npr. v [6]. Ker matematični model ni nikoli povsem enak procesu, dobimo pri opisanem prediktivnem vodenju napako v ustaljenem stanju. To napako običajno kompenziramo z dodajanjem razlike med izmerjeno vrednostjo in vrednostjo modela na izhod modela.

$$J = \sum_{i=1}^P w_i (r_i - y_i)^2 + \sum_{i=1}^C w_{ii} (\Delta u_i)^2 \quad (4)$$

3.2 Generator kratkoročnih trajektorij

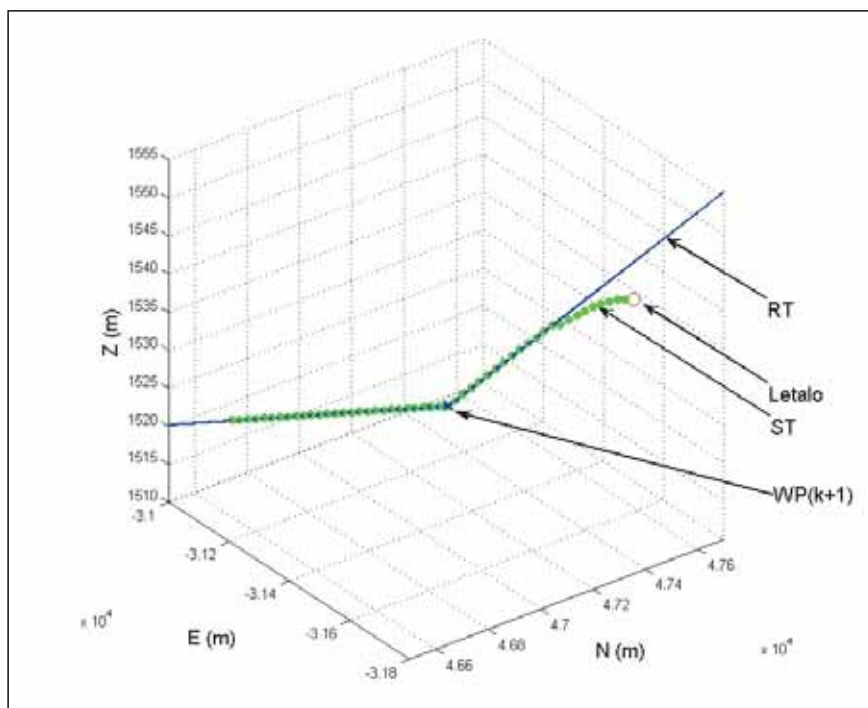
Prediktivna metoda vodenja sloni na ekvidistančnem časovnem zaporedju signalov. To pomeni, da so signali podani v obliki časovnega zaporedja preteklih, trenutnih in prihodnjih vrednosti. Ta način pa ni skladen z načinom opisa referenčne trajektorije leta (RT), ki je podana v obliki prostorske krivulje, ki v splošnem ni funkcija časa. Da bi lahko povezali časovni koncept prediktivne metode vodenja in prostorski koncept referenčne trajektorije leta, smo uvedli "generator kratkoročnih trajektorij". Kratkoročna trajektorija (ST) je definirana kot časovno ekvidistančno zaporedje prostorskih točk:

$$ST = (P(1), P(2), \dots, P(n)) \quad (5)$$

Število točk n mora biti enako prediktivnemu horizontu regulatorja (v našem primeru 50). Kratkoročna trajektorija se na novo izračuna pred vsakim računskim korakom regulatorja. Začetek oziroma prva točka kratkoročne trajektorije je v točki trenutnega položaja letala P_A .

$$P(1) = P_A \quad (6)$$

Ostale točke pa se določijo tako, da kratkoročna trajektorija (ST) mehko konvergira k referenčni trajektoriji leta (RT). Razmere pojasnjuje *slika 2*. Modra polna črta je referenčna trajektorija leta (RT), rdeči krog je tre-



Slika2. Referenčna trajektorija (RT) in kratkoročna trajektorija (ST)

nutni položaj letala (P_A), zelene pike pa predstavljajo zaporedje časovno ekvidistančnih točk kratkoročne trajektorije (ST).

Zaporedje točk trajektorije se tvori iterativno. Predpostavimo, da se letalo nahaja vzdolž segmenta $[WP(k), WP(k+1)]$ referenčne trajektorije. Nova točka je izražena kot vsota predhodne točke in vektorja inkrementa Inc :

$$P(i+1) = P(i) + Inc \quad (7)$$

Da bi bile točke trajektorije časovno ekvidistančne, mora biti dolžina vektorja Inc enaka produktu prihodnje hitrosti letala v in intervalu dt med dvema računskima korakoma regulatorja. Prihodnja hitrost je neznan, zato jo aproksimiramo s prihodnjo zeleno hitrostjo $v(k)$, ki pa je predpisana za vsak segment referenčne trajektorije:

$$\|Inc\| = v(k) \cdot dt \quad (8)$$

V enačbi oznaka $\|\cdot\|$ pomeni kvadratično normo. Nato uvedemo lokalni kartezični koordinatni sistem z naslednjimi enotnimi vektorji:

P – enotni vektor, vzporeden z aktualnim segmentom referenčne trajektorije leta,

L – enotni vektor, pravokoten na P in hkrati vzporeden z ravnino X-Y,
 D – enotni vektor, pravokoten na P in L ,

Vektor Inc izrazimo kot vsoto treh komponent, ki so vzporedne z enotnimi vektorji P, L in D :

$$Inc = Inc_P + Inc_L + Inc_D \quad (9)$$

Komponente vektorja Inc izračunamo na podlagi vektorja Dev , ki poteka od zadnje generirane točke na kratkoročni trajektoriji $P(i)$ do najbližje točke na referenčni trajektoriji leta, ki jo označimo kot P_C . Vektor Dev je torej pravokoten na trenutno aktualni segment $[WP(k), WP(k+1)]$ referenčne trajektorije RT. Najbližjo točko P_C na referenčni trajektoriji izračunamo z naslednjo enačbo:

$$P_C = WP(k) + (WP(k+1) - WP(k)) \cdot s$$

$$s = \frac{(WP(k) - P(i)) \cdot (WP(k+1) - WP(k))^T}{(WP(k+1) - WP(k)) \cdot (WP(k+1) - WP(k))^T} \quad (10)$$

Nato izračunamo vektor Dev :

$$Dev = P_C - P(i) \quad (11)$$

Tudi ta vektor razstavimo v tri komponente, ki so vzporedne z enotnimi vektorji P, L in D :

$$Dev = Dev_P + Dev_L + Dev_D \quad (12)$$

Zaradi pravokotnosti vektorja Dev na referenčno trajektorijo je komponenta Dev_P enaka 0. Sedaj določimo komponente vektorja Inc tako, da bo zagotovljeno pojemajoče (tj. mehko) približevanje referenčni trajektoriji. Najprej se posvetimo komponenti Inc_L . Hitrost približevanja v smeri vektorja L naj bo odvisna od oddaljenosti od referenčne trajektorije, funkcijsko odvisnost definiramo za tri cone oddaljenosti, veliko, srednjo in majhno:

- v primeru velike oddaljenosti (norma od Dev_L večja od d_{L2}) je vpadni gradient približevanja konstanten in enak vrednosti g_L
- v primeru srednje oddaljenosti (norma od Dev_L manjša od d_{L2} in hkrati večja od d_{L1}) vpadni gradient pada linearno z zmanjševanjem razdalje od vrednosti g_L navzdol
- v primeru zelo majhne oddaljenosti (norma od Dev_L manjša od d_{L1}) se nova točka (in posledično vse sledeče točke) postavi na referenčno trajektorijo.

Režim formalno opišemo takole:

$$\begin{aligned} \|Dev_L\| > d_{L2} : Inc_L &= g_L \cdot ds \cdot \frac{Dev_L}{\|Dev_L\|} \\ d_{L1} \leq \|Dev_L\| \leq d_{L2} : Inc_L &= g_L \cdot ds \cdot \frac{Dev_L}{d_{L2}} \\ \|Dev_L\| < d_{L1} : Inc_L &= Dev_L \end{aligned} \quad (13)$$

V enačbi (13) nastopajo naslednji parametri:

d_{L2}, d_{L1} – razdalji, ki definirata tri cone oddaljenosti v ravnini $L \times P$,
 g_L – začetni vpadni gradient približevanja v ravnini $L \times P$.

Po enakem principu izračunamo še komponento Inc_D . Parametri so v tem primeru naslednji:

d_{D2}, d_{D1} – razdalji, ki definirata tri cone oddaljenosti v ravnini $D \times P$,
 g_D – začetni vpadni gradient približevanja v ravnini $D \times P$.

Končno izračunamo še komponento Inc_P , pri izračunu pa uporabimo pogoj, da mora skupna dolžina vektorja ustrezati enačbi (8):

$$Inc_p = P \cdot \sqrt{ds^2 - \|Inc_L\|^2 - \|Inc_D\|^2} \quad (14)$$

Enačba (14) zahteva še izpolnjenost naslednjega pogoja:

$$\|Inc_L\|^2 + \|Inc_D\|^2 < ds^2 \quad (15)$$

Da bi bil ta pogoj izpolnjen v vseh treh conah, mora veljati:

$$g_L^2 + g_D^2 < 1 \quad (16)$$

V praksi smo izbrali $g_L = g_D = 0,4$. V vsaki iteraciji izračunamo še geometrijski kot $Ang_{xz}(i)$ vektorja Inc glede na ravnino X-Z, ki je tudi potreben za vodenje letala:

$$Ang_{xz}(i) = \tan^{-1} \frac{Inc_Y}{Inc_X} \quad (17)$$

Zgornje enačbe predpostavljajo, da kratkoročna trajektorija poteka vzdolž enega samega segmenta referenčne trajektorije $[WP(k), WP(k+1)]$. Vendar pa vedno pride do situacije, ko trajektorija poteka vzdolž dveh ali več segmentov, kot prikazuje slika 2. Matematični kriterij, ki sproži preklon na naslednji segment, je določen z naslednjim skalarnim produktom:

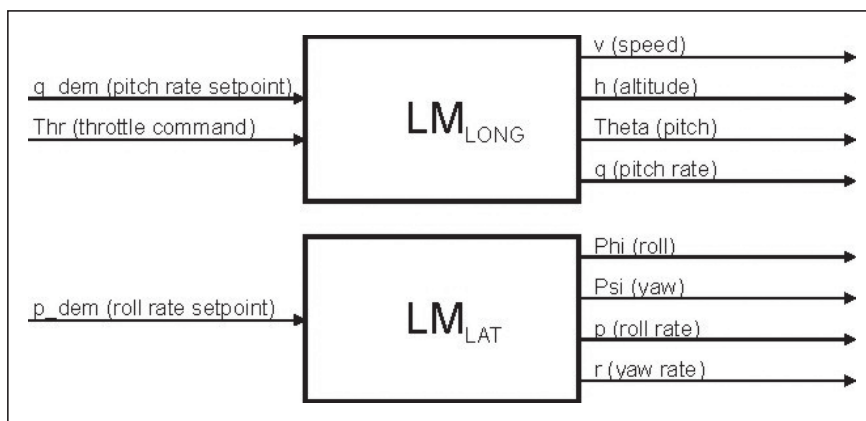
$$Sw = (WP(k+1) - WP(k)) \cdot (WP(k+1) - P(i))^T$$

if $(Sw < 0)$ then $k = k + 1$ (18)

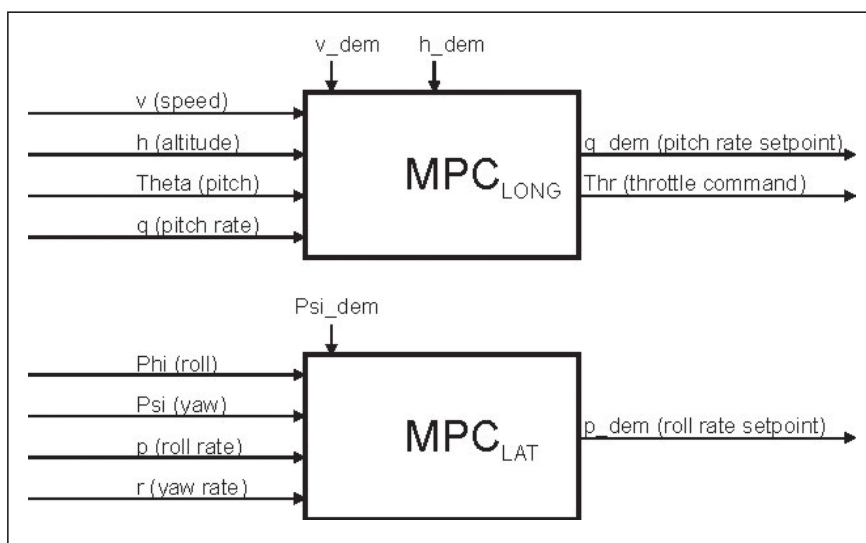
Po preklopu segmenta je potrebno v enačbah (8) in (10) upoštevati novo vrednost za k , to je $k = k + 1$.

3.3 Implementacija prediktivnega vodenja

Kot je bilo omenjeno, smo za izvedbo sistema za sledenje trajektoriji izbrali prediktivno metodo vodenja (MPC). Za realizacijo smo uporabili knjižnico MPC, ki je del programskega paketa Matlab. Prediktivna metoda potrebuje za načrtovanje in delovanje linearni dinamični model procesa (LM). Linearni model v splošnem lahko dobimo eksperimentalno iz vhodnih in izhodnih signalov procesa. V našem primeru proces predstavlja letalo skupaj z regulacijskim sistemom za stabilizacijo, ki je opisan v razdelku 2.6.



Slika3. Linearni model, longitudinalni in lateralni del (prevodi v tabeli 1)



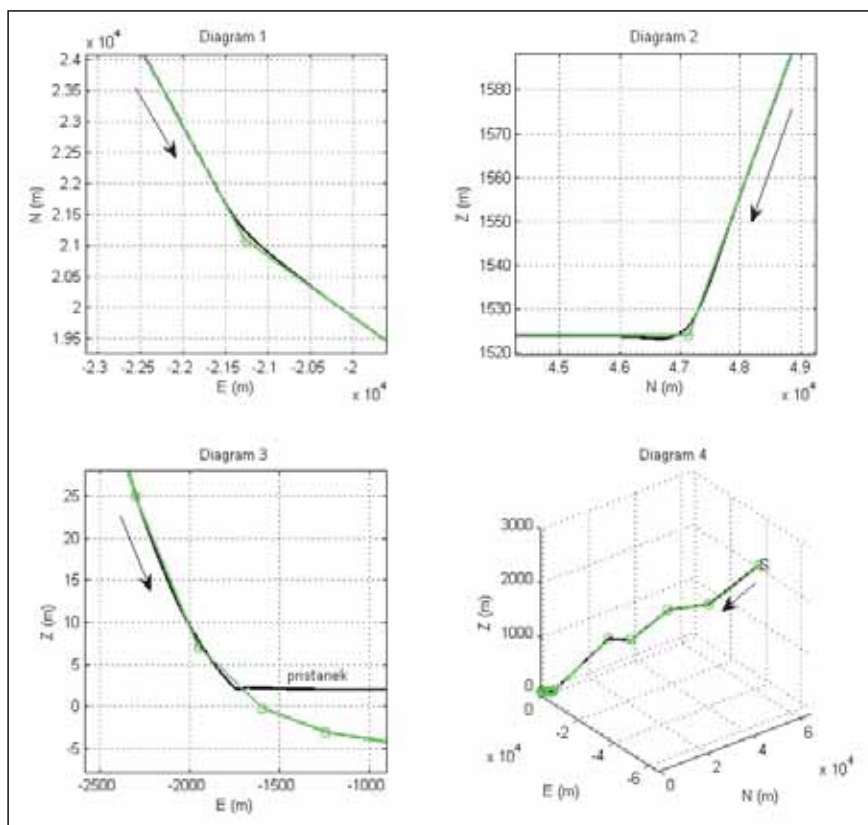
Slika4. Regulator MPC, longitudinalni in lateralni del (prevodi v tabeli 1)

V simulacijskem okolju smo namesto pravega letala uporabili njegov nelinearni matematični model, opisan v razdelku 2.1. Linearni model pa smo dobili po naslednjem postopku. Z uporabo začasnih PID-regulatorjev smo nelinearni model letala pripeljali v želena delovno točko in počakali, da so se vsi izhodni signali ustalili (angl. trimmed condition). Nato smo

vrednost enega od vhodnih krmilnih signalov malo spremenili ($u \rightarrow u + \varphi$) in izmerili odzive vseh izhodnih signalov. Iz odzivov smo z identifikacijo izračunali pripadajoče prenosne funkcije linearnega modela. Postopek smo ponovili za vse tri vhodne regulirne signale (p_dem , q_dem in Thr). Prenosne funkcije so pokazale, da je možno linearni model (LM) ločiti v

Tabela1. Pomeni spremenljivk

Sprem.	Pomen
v	hitrost
h	višina
Φ	kot med prečno (y) osjo letala in horizontom (angl. roll)
Θ	kot med vzdolžno (x) osjo letala in horizontom (angl. pitch)
Ψ	kot med vzdolžno (x) osjo letala in severom (angl. yaw)
p	kotna hitrost okoli vzdolžne osi letala (angl. roll rate)
q	kotna hitrost okoli prečne osi letala (angl. pitch rate)
r	kotna hitrost okoli navpične osi letala (angl. yaw rate)
v_dem	želena vrednost hitrosti; vektor: $v_dem(i)=v; i=1...n$
h_dem	želena vrednost višine, vektor: $h_dem(i)=PZ(i); i=1...n$
Ψ_dem	želena vrednost kota Ψ , vektor: $\Psi_dem(i)=Ang_{xz}(i); i=1...n$
p_dem	želena vrednost kotne hitrosti p
q_dem	želena vrednost kotna hitrosti q
Thr	komanda za moč motorjev



Slika 5. Sledenje referenčni trajektoriji in pristanku

dva neodvisna linearna modela, enega za longitudinalni del (LM_{LONG}) in drugega za lateralni del (LM_{LAT}). Vhodi in izhodi obeh modelov so razvidni s slike 3 in dodatno pojasnjeni v okviru tabele 1.

Ker smo linearni model razdelili na dva dela, smo tudi prediktivni regulator (MPC) razdelili na dva dela, to je na longitudinalni regulator MPC_{LONG} (regulacija višine in hitrosti leta) ter lateralni regulator MPC_{LAT} (regulacija smeri leta). Takšen način razdelitve problema je v tehnologiji sistemov za vodenje letal precej pogost. Vhodi in izhodi obeh regulatorjev so prikazani na sliki 4 in pojasnjeni v tabeli 1. Spremenljivke na slikah 3 in 4 imajo naslednje pomene:

4 Rezultati

V okviru simulacijskega okolja je bila definirana množica testnih scenarijev, ki predpisujejo referenčno trajektorijo ter zunanje vplive (veter, turbulence). Rezultati delovanja so bili dobri in so v glavnem potrdili pričakovane prednosti sistema. Slika 5 prikazuje primer sledenja trajektoriji in pristanka. Zelena črta predstavlja referenčno

trajektorijo RT, zeleni krogi so točke poti $WP(k)$, črna črta pa je dejansko pot letala. E, N in Z pomenijo koordinate vzhod, sever in višino. Diagram 4 prikazuje slednje vzdolž celotne referenčne trajektorije v treh dimenzijah. Diagram 1 prikazuje panoramski pogled v območju spremembe lateralne smeri referenčne trajektorije. Diagram 2 prikazuje stranski pogled v območju spremembe naklona referenčne trajektorije. Diagram 3 pa prikazuje stranski pogled v območju pristanka. Po pristanku letalo ne sledi več višinski komponenti trajektorije, saj je ta definirana nekoliko pod nivojem steze.

5 Zaključek

Prispevek opisuje načrtovanje in izvedbo sistema za vodenje letala na osnovi prediktivne regulacije in

kratkoročnih trajektorij, ki je del širšega sistema za avtomatsko pristajanje letal na osnovi strojnega vida. Sistem za vodenje letala je bil preizkušen v simulacijskem okolju v idealnih razmerah (položaj in orientacija letala merjena brez napake) in v razmerah, ki so bolj podobne realnim (položaj in orientacija izračunana s slike). V obeh primerih je bilo delovanje dobro, potrdile so se pričakovane prednosti prediktivne regulacije v primerjavi s klasičnimi metodami, predvsem zaradi zmožnosti upoštevanja vnaprej predpisane referenčne trajektorije leta.

Literatura

- [1] Information about the project PEGASE on the internet: <http://dassault.ddo.net/pegase/>.
- [2] L. Vacchetti, V. Lepetit, P. Fua. Stable real-time 3d tracking using online and offline information. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 26(10): 1385–1391, 2004.
- [3] S. Fürst, E. D. Dickmanns: "A Vision Based Navigation System for Autonomous Aircraft", 5th Int. Conf. on Intelligent Autonomous Vehicles 'IAS-5', Sapporo, JP, June 1998, 765–774.
- [4] B. Espiau, F. Chaumette, P. Rives: A New Approach to Visual Servoing in Robotics, IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol.8, N.3, June 1992.
- [5] P. Rives, J. R., Azinheira: Line-arc Structures Following by an Airship using Vanishing Point and Horizon Line in a Visual Servoing Scheme, Int. Conf. On Robotics and Automation, ICRA04, New Orleans, USA, April 2004.
- [6] J. M. Maciejowski, Predictive Control with Constraints, Prentice Hall, 36–70, 2002.



<http://dsc.ijs.si/>

Aircraft flight control system based on the predictive control method and short-term reference trajectories

Abstract: In this paper we present a simulation prototype of a flight control system based on the predictive control method and short-term reference trajectory generation. This system is a part of a system for automatic landing of aircrafts, where aircraft position and orientation are estimated on-line from images, acquired from the aircraft during flight. The advantage of the predictive control method is in its ability to improve the control performance by considering the predefined reference flight trajectory. In addition, it can also compensate the time delay and measurement noise, which are both consequences of image processing. We introduced a concept of short-term trajectories, which generates a time sequence of reference signals on the basis of aircraft current position and predefined reference trajectory. The entire system was successfully tested in the simulation environment.

Keywords: flight control system, predictive control, short-term reference trajectories, visual servoing.

Zahvala

Zahvaljujemo se Evropski komisiji za finančno podporo v okviru pogodbe AST5-CT-2006-030839 in Agenciji za raziskovalno dejavnost RS za finančno podporo v okviru programa PR-0001 in projekta PR00215.

Spoštovani poslovni partnerji

Družba Kladivar d.o.o. je v letu 2007 postala del skupine Poclain Hydraulics Group. S prihodom v skupino je Kladivar postal **kompetentni center skupine Poclain Hydraulic Group za razvoj, proizvodnjo in strokovno podporo prodaje hidravličnih ventilov in naprav**, prevzel je standarde poslovanja skupine in njen sistem vodenja.

Da bi družbo Kladivar integrirali v skupino Poclain Hydraulics Group in poenotili razmerja med našimi partnerji in skupino, smo se odločili, da

Kladivar d.o.o., s 1. novembrom 2009 uvede celotno podobo skupine Poclain Hydraulics Group.



Spremembe podobe bodo vidne predvsem na:

- **dokumentih**, kot so ponudbe, naročila, računi, navodila za uporabo, izjave o skladnosti ter drugi splošni dopisi
- **proizvodih**: sprememba logotipa na napisni tablici in kosovni embalaži
- **promocijskih sredstvih in tehnični dokumentaciji**, kot so prospekti o družbi in proizvodih, tehnični katalogi ter risbe
- **komunikacijskih sredstvih in medijih**, kot so poslovne vizitke, internetni naslov, naslovi elektronske pošte in podobno.

Ime družbe ostaja še naprej:

Kladivar, tovarna elementov za fluidno tehniko Žiri, d.o.o

Kladivar d.o.o
Poclain Hydraulics Group
Milan Kopač, direktor