

SIMULTANA PROCENA PARAMETARA KRETANJA I STRUKTURE SCENE INTEGRACIJOM INERCIJALNE I VIZUELNE NAVIGACIJE

Stevica Graovac, Elektrotehnički fakultet, Beograd

Sadržaj – U radu se razmatra algoritam simultane procene parametara kretanja i strukture scene pomoću integrisanog navigacionog sistema koga čine skup inercijalnih senzora (tri brzinska žiroskopa i tri linearna akcelerometra) i TV kamera. Svi pomenuti senzori su kruto fiksirani za telo pokretnog objekta. Za inercijalne senzore se usvaja da poseduju konstantna odstupanja. U okolnoj sceni se pretpostavlja postojanje prepoznatljivih repernih objekata na apriorno poznatim lokacijama u referentnom koordinatnom sistemu. Paralelnim procesiranjem informacija u dva nezavisna navigaciona sistema stvara se mogućnost uzajamnih korekcija sa ciljem optimalne procene sopstvenog linearnog i ugaonog položaja u odnosu na reporni objekat (strukture scene), kao i sopstvenih linearnih i ugaonih brzina (parametara kretanja).

1. UVOD

Integracija više raznorodnih navigacionih sistema je rasprostranjen metod, kako povišenja ukupne pouzdanosti u radu, tako i rezultatne tačnosti u proceni navigacionih parametara. Najčešće je u pitanju integracija inercijalnih navigacionih sistema (INS) sa drugima, kao što su: satelitski globalni sistem pozicioniranja (GPS), sistemi zasnovani na radarskim visinomerima i Dopler radarima, vizuelni navigacioni sistemi (VNS) na bazi TV ili IC kamera i dr. Osnovni smisao je da se pomoću skupa merenja koji potiču van INS, nekim algoritmom estimacije što tačnije procene stanja navigacionog sistema (vektori linearnog položaja i brzine pokretnog objekta u odnosu na referentni koordinatni sistem), ali istovremeno i parametri koji karakterišu netačnosti inercijalnih senzora u sklopu INS.

Kada je u pitanju integracija INS i VNS moguće je, zavisno od konkretne namene, razmatrati više nivoa stepena sprege. U okviru pojedinih sistema vođenja vojne namene, INS je nadležan za dovođenje objekta u region u kome je moguće uočiti cilj pomoću TV kamere i nakon njegovog zahvata, vođenje preuzima nezavisni VNS. U ovakvim slučajevima dva sistema deluju u sklopu jedinstvenog sistema vođenja ali praktično ne razmenjuju informacije. Prisustvo prepoznatljivih vizuelnih repora u vidnom polju TV kamere može se na različite načine iskoristiti kao izvor informacija za korekciju INS. Opšti principi fuzije ova dva sistema u svrhe povišenja tačnosti navigacije razmatrani su u [1], a njihov ravnopravni tretman u svrhe inicijalizacije i međusobne korekcije je predmet interesovanja u radovima [2,3]. Implicitno se kod ovih pristupa ipak INS smatra kao "master" sistem koji je kontinualno operativan i to sa visokom učestanošću odabiranja, a inicijalno i/ili tokom rada, se kalibriše ili koriguje na bazi informacija iz VNS (za koje se pretpostavlja da su višeg nivoa tačnosti). Sličan nivo sprege se može uočiti i u slučajevima [4-6], gde se kao osnovni sistem pojavljuje VNS u kome je primenjen algoritam dinamičke vizije, pri čemu se neophodne informacije o linearnim brzinama i ugaonoj orijentaciji pokretnog objekta preuzimaju iz INS kao tačne.

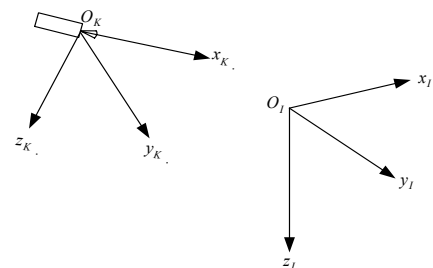
U ovom radu se daje okvir za razmatranje najvišeg stepena sprege između INS i VNS. Uslovno će se usvojiti da je VNS primaran, odnosno, da se ovaj pristup prvenstveno odnosi na primene u robotici i automatskom upravljanju vozilima na putevima i da je krajnji cilj procena strukture scene (rastojanje pokretnog objekta do repera – prepreke i ugaona orijentacija objekta – TV kamere). VNS algoritam uključuje dva paralelna mehanizma: 1) autnomne procene na bazi apriornog poznavanja karakteristika repornog objekta proračunate na osnovu opštih principa projekcije geometrije [7] i 2) procene na osnovu obrade sekvence kadrova korišćenjem informacija iz INS (dinamička vizija). Pri tome je ideja da se informacije iz INS ne preuzimaju kao tačne, već da se pogodno inkorporira i proces estimacije parametara kretanja u INS (linearnih i ugaonih brzina) na bazi merenja u VNS, kako bi se povisila njihova tačnost, odnosno, procenila netačnost inercijalnih senzora.

U drugom odeljku rada se definišu osnovni matematički modeli INS i VNS algoritama kao i scenario kretanja objekta i tipa zemaljskih repora pogodnih za verifikaciju ovog pristupa. Treći odeljak se odnosi na sam predloženi algoritam simultane procene strukture scene i parametara kretanja integracijom pojedinih navigacionih algoritama i uz pomoć procesiranja signala razlike njihovih izlaza. U četvrtom odeljku su priloženi neki karakteristični rezultati dobijeni u simulaciji rada ovog algoritma.

2. MODELI NAVIGACIONIH ALGORITAMA

2.1 Inercijalni navigacioni algoritam

Relevantni koordinatni sistemi su definisani na slici 1. Referentni koordinatni sistem u kome se proračunava položaj vođenog objekta je označen sa $O_I x_I y_I z_I$ i smatraće se da je nepokretan (inercijalan – indeks I). Za telo vođenog objekta se fiksira pokretan koordinatni sistem $O_K x_K y_K z_K$. TV kamera je kruto vezana za telo vođenog objekta i jednostavnosti radi će se pretpostaviti da se centralna osa vidnog polja poklapa sa njegovom podužnom osom (indeks K).



Sl. 1. Referentni (IKS) i vezani (KKS) koordinatni sistem
 Kinematski model translatornog kretanja objekta u referentnom koordinatnom sistemu se predstavlja kao:

$$\begin{aligned} \dot{\vec{v}}_I &= T_{I/K} \vec{a}_K + \vec{g}_I; \quad \vec{v}_I(0) = \vec{v}_{I0} \\ \dot{\vec{x}}_I &= \vec{v}_I; \quad \vec{x}_I(0) = \vec{x}_{I0} \end{aligned} \quad (1)$$

gde je:

$$\vec{x}_I = [x_I \quad y_I \quad z_I]^T - \text{vektor linearnog položaja objekta;}$$

2.3 Vizuelni navigacioni algoritam na bazi dinamičke vizije

Osnovne relacije koje karakterišu vizuelnu navigaciju (model stanja (10-11) i merenja u sistemu (12)) su u važnosti i u ovom slučaju. Kao apriorno poznate veličine (merene pomoću nezavisnih senzora) se posmatraju vektori linearne brzine \vec{v}_K i ugaone brzine $\vec{\omega}_K$ koji u (11) figurišu kao parametri, kao i ugaona orijentacija kamere $T_{K/I} = T_{I/K}^T$. Izvor ovih informacija je inercijalni navigacioni sistem. Obradom slika iz TV kamere određuje se pomeraj lika karakteristične tačke repera u dva uzastopna kadra. Novi položaj reporne tačke u KKS će se označiti kao $[x_K + \Delta x_K \quad y_K + \Delta y_K \quad z_K + \Delta z_K]^T$, a do priraštaja vektora \vec{x}_K dolazi usled pomeraja objekta i promene njegove ugaone orijentacije:

$$\Delta \vec{x}_K = \Delta T_{K/I} T_{K/I}^T \vec{x}_K - (T_{K/I} + \Delta T_{K/I}) \Delta \vec{x}_I \quad (19)$$

Pomeraj položaja centra repera u SKS je određen sa

$$\begin{aligned} \Delta x_L &= f \frac{\Delta y_K}{x_K + \Delta x_K} - x_L \frac{\Delta x_K}{x_K + \Delta x_K} \\ \Delta y_L &= f \frac{\Delta z_K}{x_K + \Delta x_K} - y_L \frac{\Delta x_K}{x_K + \Delta x_K} \end{aligned} \quad (20)$$

Kako se vektor \vec{x}_K može izraziti kao $\vec{x}_K = x_K [f \quad x_L \quad y_L]^T$, poznavanje $\Delta \vec{x}_I, T_{K/I}, \Delta T_{K/I}$ na bazi INS omogućuje da se komponente $\Delta \vec{x}_K$ iz (19) izraze u funkciji x_K, x_L, y_L . Njihovom zamenom u (20) se izračunava x_K , a preko (12) i preostale dve komponente (y_K, z_K) što konačno omogućuje izračunavanje sopstvenog položaja u IKS kao: $\vec{x}_I = -T_{I/K} \vec{x}_K$.

2.4 Scenario primene

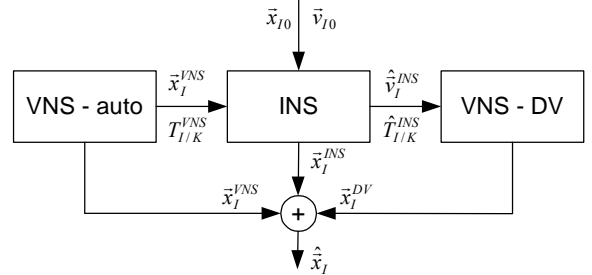
Pretpostavice se pravolinijska trajektorija objekta koji polazi iz početnog položaja $\vec{x}_{I0} = [-1000 \quad -100 \quad -100]^T$ i kreće se konstantnom brzinom duž x-ose IKS $\vec{v}_{I0} = [10 \quad 0 \quad 0]^T$. KKS se poklapa sa IKS. Linearni akcelerometri poseduju konstantno odstupanje od 10mg (= 0.1m/s²), a brzinski žiroskopi od 36°/h (= 0.174 mrad/s). Merni šumovi akcelerometara i brzinskih žirosopa se usvajaju kao beli, sa gausovskom raspodelom, nultih srednjih vrednosti i sa standardnim devijacijama: $\sigma_{akc} = 10\text{mg}$ i $\sigma_{b\ddot{z}} = 1\text{mrad/s}$, respektivno. Za optički sistem TV kamere usvaja se da je žižna daljina poznata ($f = 1$). Pretpostavice se da je određivanje karakterističnih tačaka u SKS takođe okarakterisano šumom i to nulte srednje vrednosti i standardne devijacije od jednog elementa slike – piksela. Usvajajući da je širina ukupnog vidnog polja 25.6° i da slika ima po 512 piksela duž oba pravca, ugaoni ekvivalent ove greške je 0.05° (= 0.87mrad). Centar repornog objekta je u koordinatnom početku IKS (kao na sl. 2). Trakaste površine su širine 20m i uočljivog kontrasta u odnosu na pozadinu. Referentno rastojanje ($O_I A$) je u ovom slučaju 14.1m. Učestanosti odabiranja su 100Hz u INS i 10 Hz u VNS.

3. INTEGRISANI NAVIGACIONI ALGORITAM

3.1 Opšta struktura

Struktura integrisanog navigacionog algoritma je data na sl. 3. Procena položaja objekta u IKS se kontinualno dobija na izlazu INS a koriguje usrednjavanjem sa procenama iz dva tipa VNS u momentima kada su one raspoložive. Procena

linearne brzine se dobija u INS na bazi korekcija iz autonomnog VNS i prosleđuje ka VNS zasnovanom na dinamičkoj viziji. Isto važi i za procenu ugaone orijentacije objekta. Time se na bazi potpunog skupa merenja (linearna ubrzanja, ugaone brzine, položaji u TV slici tačaka repera i njihovi pomeraji u dva uzastopna kadra) simultano procenjuju struktura scene i parametri kretanja.



Sl. 3. Struktura integrisanog navigacionog algoritma

3.2 Korekcija INS

Model sistema u prostoru stanja koji se dobija objedinjavanjem (1), (4) i (7) je očevidno nelinearan i da bi se primenio koncept optimalnog linearnog rekurzivnog estimatora stanja, neophodno ga je linearizovati u okolini procenjenog vektora stanja u formi

$$\dot{\hat{x}} = \frac{d}{dt} (\hat{X} - \bar{X}) = F\hat{x} + G\bar{u} \quad (21)$$

gde se matrice F i G dobijaju parcijalnim diferenciranjem nelinearne vektorske funkcije $\dot{X} = \Phi(\bar{X}, \bar{u})$ po promenljivim stanja (8) i stohastičkim ulazima navedenim kao komponente mernih signala (5,6).

Kao mereni izlazi tretiraju se razlike između proračuna izvedenih u INS i autonomnom VNS.

Kako je model stanja visokog reda (16) od interesa je izvršiti njegovo raspredanje na dva podsistema. Nezavisno će se posmatrati model rotacionog kretanja koji obuhvata kao promenljive stanja vektore \vec{b} i $\vec{\omega}_b$. Nakon što se u (4) unesu izrazi za merene ugaone brzine (6) i izvrši parcijalno diferenciranje, odgovarajuće matrice iz izraza (21) ovde imaju značenje:

$$\begin{aligned} F_{7 \times 7}^1 &= \begin{bmatrix} \Omega_{4 \times 4}^* & \hat{B}_{4 \times 3} \\ 0_{3 \times 4} & 0_{3 \times 3} \end{bmatrix}, \quad G_{7 \times 3}^1 = \begin{bmatrix} \hat{B}_{4 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} \end{bmatrix} \\ \hat{B}_{4 \times 3} &= \begin{bmatrix} \hat{b}_4 & -\hat{b}_3 & \hat{b}_2 \\ \hat{b}_3 & \hat{b}_4 & -\hat{b}_1 \\ -\hat{b}_2 & \hat{b}_1 & \hat{b}_4 \\ -\hat{b}_1 & -\hat{b}_2 & -\hat{b}_3 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (22)$$

Vektor \vec{b} proračunat u VNS korespondira sa matricnom transformacijom $T = T_{I/K}^{VNS}$ na sledeći način:

$$\vec{b} = \begin{bmatrix} \frac{t_{32} - t_{23}}{4b_4} & \frac{t_{13} - t_{31}}{4b_4} & \frac{t_{21} - t_{12}}{4b_4} & 0.5\sqrt{1 + \text{Trace}(T)} \end{bmatrix}^T \quad (23)$$

Statistički parametri šuma modela stanja se usvajaju na osnovu pretpostavki o parametrima mernog šuma u signalima brzinskih žiroskopa. U slučaju mernog šuma na izlazu, posmatraju se parametri šuma koji reprezentuje neodređenost u lociranju tačaka iščezavanja P i Q. Povišenje tačnosti proračuna orijentacije u VNS (matrice $T_{I/K}^{VNS}$) se postiže uz pomoć sledeća dva koraka u VNS algoritmu: 1) pri lociranju tačaka iščezavanja se u proračun paralelnih pravaca strana

paralelograma ne uključuju samo temena, već i sve tačke duž ivica trakaste površine, nakon čega se definiše linija koja najbolje fituje ovaj skup; 2) i pored ovoga, transformaciona matrica koja se dobija u (15) u opštem slučaju neće zadovoljiti uslov ortogonalnosti, tj. usled konačne rezolucije TV slike ne može se očekivati da je egzaktno ispunjen uslov $\bar{m}_p \bar{m}_Q = 0$. Stoga je na ovom koraku predviđen postupak za iterativnu korekciju ovih pravaca tako da se u rezultatu dobije $\hat{m}_p \hat{m}_Q = 0$, a za pravac vertikale se usvaja $\hat{m}_p \times \hat{m}_Q$. U drugom delu algoritma se na ekvivalentan način vrši optimalna estimacija preostalog dela vektora stanja iz (8) ($[\bar{x}_I^T \bar{v}_I^T \bar{a}_b^T]^T$). Pri ovome se u modelu stanja (1) koristi transformaciona matrica $\hat{T}_{I/K}$ iz prve faze korekcije.

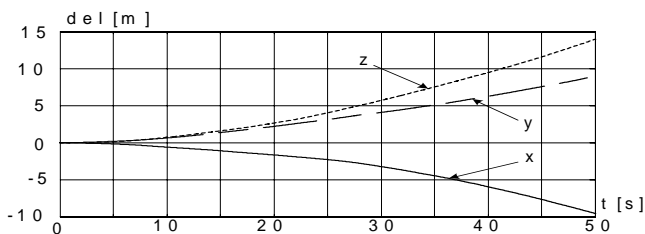
3.3 DV algoritam na bazi korigovanog INS

Nakon što su u okviru INS izvršene korekcije informacije o ugaonom položaju objekta i linearnoj brzini, njih preuzima algoritam dinamičke vizije i na bazi dva uzastopna kadra, preko (19-20) određuje sopstvenu procenu položaja \bar{x}_I^{DV} .

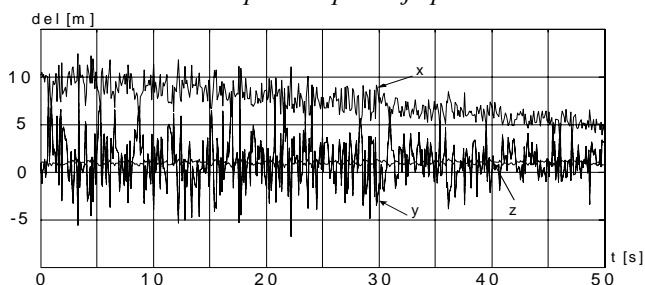
3.4 Rezultantne procene

U 2.4 je predviđena realistična situacija da je učestanost odabiranja u INS veća nego u VNS. Stoga se može reći da INS "kontinualno" obezbeđuje podatke o strukturi scene, a da se nakon izvršenih merenja u VNS i DV, periodično vrše njihove korekcije, usrednjavanjem svih raspoloživih podataka. Parametre kretanja proračunava samo INS, ali se pomoću merenja iz VNS procenjuju odstupanja inercijalnih senzora i time vrši njihova korekcija.

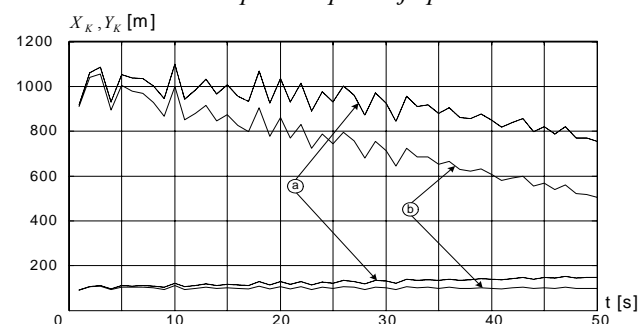
4. ILUSTRACIJA REZULTATA



Sl. 4. Greške u proceni položaja pomoću INS



Sl. 5. Greške u proceni položaja pomoću VNS



Sl. 6. Procena položaja pomoću DV

Ilustrovani su se neki osnovni rezultati do kojih se dolazi primenom ovog koncepta integracije INS i VNS. Na slici 4. su prikazane rastuće greške u proračuna položaja objekta u IKS na bazi nekorigovanog INS tokom 50s. Odgovarajuće greške pri proceni položaja pomoću VNS date su na slici 5. Uočava se da su one oscilatorne i opadajuće sa približavanjem referentnom objektu. Slika 6. ilustruje procene položaja pomoću DV algoritma i to sa nekorigovanim (a) i korigovanim (b) podacima iz INS. Dok su pre korekcije ovi podaci veoma niske tačnosti, nakon korekcije njihova tačnost se približno poklapa sa VNS.

5. ZAKLJUČAK

Razmatrani okvir za sprezanje sistema inercijalne i vizuelne navigacije oslanja se na ideju da se proširenjem skupa senzora (čije netačnosti potiču od različitih fizičkih uzročnika) i pogodnim kombinovanjem rezultata dobivenih različitim navigacionim algoritmima, može povisiti ukupna tačnost navigacionog proračuna. Procene iz autonomnog VNS služe za korekciju pokazivanja senzora u INS, a korigovane procene brzine i orijentacije iz INS se koriste u VNS algoritmu tipa dinamičke vizije. Rezultantna procena strukture scene dobiva se usrednjavanjem tri različita rezultata proračuna. Dalje istraživanje u ovom domenu će biti usmereno ka generalizaciji scenarija primene ovakvog pristupa i formalizaciji dokaza njegovih prednosti u odnosu na druge strukture fuzije INS i VNS.

6. LITERATURA

- [1] Graovac, S.: "Razvoj kombinovanog algoritma inercijalne i vizuelne navigacije", Doktorski rad, ETF, Beograd, 2000.
- [2] Alves, J., J. Lobo, J. Diaz: "Camera-Inertial Sensor Modeling and Alignment for Visual Navigation", Journal of Robotic Systems, Vol. 21, N°1, pp. 6-12, January 2004.
- [3] Graovac, S.: "Principles of Fusion of Inertial Navigation and Dynamic Vision", Journal of Robotic Systems, Vol. 21, N°1, pp. 13-22, January 2004.
- [4] Frezza, R., P. Perona, G. Picci, S. Soatto: "System-Theoretic Aspects of Dynamic Vision", in Isidori, A. (Ed.): *Trends in Control*, Springer, Berlin, 1995..
- [5] Menon, P.K.A., G.B. Chatterji, B. Sridhar: "Electro-Optical Navigation for Aircraft", IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems, Vol. AES-29, pp. 825-832, July 1993.
- [6] Graovac, S.: "A New Visual Navigation Algorithm Using Linear Acceleration Measurements", 10th Mediterranean Conference on Control and Automation, Lisbon, Portugal, July 2002.
- [7] Kanatani K.: "Geometric Computation for Machine Vision", Clarendon Press, Oxford, 1993.

Abstract – The algorithm of simultaneous estimation of motion parameters and scene structure using the integrated navigation system consisting from inertial sensors (three rate gyros and three accelerometers) and TV camera has been presented. All mentioned sensors are rigidly fixed to the body of a moving object. It is assumed that the inertial sensors are characterized by constant biases. The recognizable landmarks existing in the scene on known locations in the referent coordinate frame are assumed also. It is enabled by parallel processing of information in two independent navigation systems that they may correct each other, in order to estimate moving object's linear and angular position relative to the landmark as well as it's linear and angular velocities in an optimal fashion.

**SIMULTANEOUS ESTIMATION OF MOTION
PARAMETERS AND SCENE STRUCTURE BY THE
INTEGRATION OF INERTIAL AND VISUAL NAVIGATION**
Stevica Graovac