

Transformacijska matrika za statično korekcijo anemometra na boji Vidi

Študija

2017



Vlado Malačič

Transformacijska matrika za statično korekcijo anemometra na boji Vidi

Vlado Malačič

Marec 2017

Poročilo pregledal in korigiral: B. Petelin

MALAČIČ, Vlado. *Transformacijska matrika za statično korekcijo anemometra na boji Vidi*. Študija. Poročila MBP - Morska biološka postaja, 165, Morska biološka postaja Nacionalnega inštituta za biologijo. Marec 2017, 21 str.

Kazalo

TRANSFORMACIJSKA MATRIKA ZA STATIČNO KOREKCIJO ANEMOMETRA NA BOJI VIDI	I
1. DOPOLNITEV PREDHODNIH POROČIL O STATIČNI KOREKCIJI PODATKOV ANEMOMETRA.....	1
2. VEDENJE X-SENS MTI MERILNIKA ZASUKA IN NAKLONOV.....	3
3. TRANSFORMACIJSKA MATRIKA ZA XSSENS MTI MERILNIKE	9
4. ANEMOMETER WINDMASTERPRO	12
5. VZORČNO TESTIRANJE ROTACIJSKIH MATRIK NA PODATKIH	13
6. METODA TESTIRANJA ROTACIJSKIH MATRIK NA VZORČNIH PODATKIH	14
7. REZULTATI TESTIRANJA ROTACIJSKIH MATRIK NA VZORČNIH PODATKIH	18
DODATEK A.....	20
VIRI	21

1. Dopolnitev predhodnih poročil o statični korekciji podatkov anemometra

M. Vodopivec je dne 13. februarja 2015 (Vodopivec, 2015) osvežil poročilo, ki ga je sestavil pet let prej (Vodopivec, 2010). Prve osnove za izračun korekcije komponent vetra zaradi zasukanega in nagnjenega anemometra so bile zapisane 2002 (Grm and Malačič, 2002). V tej dopolnitvi se bomo predvsem usmerili na transformacijsko matriko A , ki prenaša lokalni koordinatni sistem merilnika kompasa (=anemometra) na boji v stalen koordinatni sistem. Gre za t. im. statično korekcijo hitrosti vetra.

Rotacijska matrika, ki je označena z S v poročilu iz leta 2002, je produkt treh rotacijskih matrik: rotacijske matrike A , ki ureja azimutni zasuk okoli Z osi, s čimer uredi pretvorbo iz zasukanega sistema v 'pravi' nezasukan sistem, nato rotacije R ('roll'), ki ureja bočni nagib okoli vzdolžne osi plovila (boje) in prevede bočno nagnjen sistem v tistega, ki ni nagnjen (je pa zasukan za azimut), ter matrike P ('pitch'), ki ureja nagib daljše osi plovila okoli prečne (horizontalne) osi, ki prebada plovilo, in s tem prevede tako nagnjen koordinatni sistem v sistem, ki je še vedno zasukan za azimut in bočno nagnjen za 'roll'. V poročilu 2002 smo zapisali $S = APR$ in je hitrost v sistemu X - Y - Z zapisana kot $v_s = APRv = Sv$, kjer je v hitrost v za azimut zasukanem in bočno ter vzdolžno nagnjenem sistemu. Vendar se v tej celotni transformaciji skriva nekaj napak v poročilu 2002. Še prej ponovimo oznake kotov, pri čemer so velike grške črke uporabljene v poročilu 2015, majhne pa v poročilu 2002: ω (oz. Ω) je azimut ('heading'), φ (oz. Φ) je bočni naklon ('roll'), θ (oz. Θ) pa vzdolžni naklon ('pitch'). V tem poročilu bomo uporabljali majhne črke ω , φ in θ .

Matrika P , ki je v poročilu 2002 zapisana kot:

$$\begin{pmatrix} 0 & \cos \theta & \sin \theta \\ 0 & -\sin \theta & \cos \theta \\ 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

bi morala biti zapisana kot

$$P = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & \sin \theta \\ 0 & -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \quad (1)$$

saj ohranja vzdolžno os plovila. Prav tako ima tudi Slika 3 napačne oznake.

Leta 2008, ob postavitvi nove boje Vide, smo menili, da bi naj bila celotna transformacijska matrika $S = ARP$ (in ne APR), legi matrike za pitch in roll morata biti zamenjani. Matrika S , ki je v poročilu 2002 zapisana na str. 66, v poročilu 2015 pa je na strani 44 celotna transformacijska matrika označena kot A v izrazu (20). V istem poročilu 2015 je na str. 16 tudi koda transformacijske matrike (function arp), vseh njenih devet elementov, ki ustrezajo zapisu A v izrazu (20). Na tem mestu ponovno zapišimo transformacijsko matriko S kot produkt ARP , kjer sta:

$$A = \begin{pmatrix} \cos \omega & \sin \omega & 0 \\ -\sin \omega & \cos \omega & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

(2)

in

$$R = \begin{pmatrix} \cos \varphi & 0 & \sin \varphi \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \varphi & 0 & \cos \varphi \end{pmatrix} \quad (3)$$

Zato je $S = ARP$:

$$S = \begin{pmatrix} \cos \omega & \sin \omega & 0 \\ -\sin \omega & \cos \omega & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \varphi & 0 & \sin \varphi \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \varphi & 0 & \cos \varphi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & \sin \theta \\ 0 & -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \quad (4)$$

$$S = \begin{pmatrix} \cos \omega & \sin \omega & 0 \\ -\sin \omega & \cos \omega & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \varphi & -\sin \theta \sin \varphi & \cos \theta \sin \varphi \\ 0 & \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \varphi & -\sin \theta \cos \varphi & \cos \theta \cos \varphi \end{pmatrix},$$

kar pripelje do:

$$S = \begin{pmatrix} \cos \omega \cos \varphi & \sin \omega \cos \theta - \cos \omega \sin \theta \sin \varphi & \cos \omega \cos \theta \sin \varphi + \sin \omega \sin \theta \\ -\sin \omega \cos \varphi & \sin \omega \sin \theta \sin \varphi + \cos \omega \cos \theta & \cos \omega \sin \theta - \sin \omega \cos \theta \sin \varphi \\ -\sin \varphi & -\sin \theta \cos \varphi & \cos \theta \cos \varphi \end{pmatrix}. \quad (5)$$

To pa je skupna rotacijska matrika A v poročilu 2015, kar je tudi uporabljeno v programski kodi, katere potrebni del bo naveden na str. 6.

Vendar je bistvo tega dodatka preverjanje, ali je determinanta matrike S enaka 1. Na to je leta 2015 opozoril meteorolog na ARSO (g. G. Belamarić). To velja, saj vsi zasuki skupaj še vedno pomenijo en zapleten zasuk koordinatnega sistema, zanj pa je značilno, da je $\det(S) = 1$. Preverimo $\det(S)$ tako, da determinanto poslednjega izraza v (5) razvijemo po prvem stolpcu, hkrati bomo upoštevali, da je $\sin^2 \omega + \cos^2 \omega = \sin^2 \varphi + \cos^2 \varphi = \sin^2 \theta + \cos^2 \theta = 1$:

$$\det(S) = \cos \omega \cos \varphi [(\sin \omega \sin \theta \sin \varphi + \cos \omega \cos \theta) \cos \theta \cos \varphi + (\cos \omega \sin \theta - \sin \omega \cos \theta \sin \varphi) \sin \theta \cos \varphi] \quad (6)$$

$$+ \sin \omega \cos \varphi [(\sin \omega \cos \theta - \cos \omega \sin \theta \sin \varphi) \cos \theta \cos \varphi + (\cos \omega \cos \theta \sin \varphi + \sin \omega \sin \theta) \sin \theta \cos \varphi] - \sin \varphi$$

$$[(\sin \omega \cos \theta - \cos \omega \sin \theta \sin \varphi)(\cos \omega \sin \theta - \sin \omega \cos \theta \sin \varphi) - (\cos \omega \cos \theta \sin \varphi + \sin \omega \sin \theta)(\sin \omega \sin \theta \sin \varphi + \cos \omega \cos \theta)].$$

Kar razvijemo:

$$\det(S) = \cos \omega \cos \varphi [\sin \omega \sin \theta \cos \theta \sin \varphi \cos \varphi + \cos \omega \cos^2 \theta \cos \varphi - \sin \omega \cos \theta \sin \varphi \sin \theta \cos \varphi + \cos \omega \sin^2 \theta \cos \varphi]$$

$$+ \sin \omega \cos \varphi [-\cos \omega \sin \theta \sin \varphi \cos \theta \cos \varphi + \sin \omega \cos^2 \theta \cos \varphi + \cos \omega \cos \theta \sin \varphi \sin \theta \cos \varphi + \sin \omega \sin^2 \theta \cos \varphi] - \sin \varphi \quad (7)$$

$$\begin{bmatrix} \sin \omega \cos \omega \sin \theta \cos \theta - \cos^2 \omega \sin^2 \theta \sin \varphi - \sin^2 \omega \cos^2 \theta \sin \varphi + \sin \omega \cos \omega \sin \theta \cos \theta \sin^2 \varphi \\ -\sin \omega \cos \omega \sin \theta \cos \theta - \cos^2 \omega \cos^2 \theta \sin \varphi - \sin^2 \omega \sin^2 \theta \sin \varphi - \sin \omega \cos \omega \sin \theta \cos \theta \sin^2 \varphi \end{bmatrix}.$$

Prečrtane člene odstranimo in ostane

$$\det(S) = \cos^2 \omega \cos^2 \varphi + \sin^2 \omega \cos^2 \varphi - \sin \varphi [-\cos^2 \omega \sin \varphi - \sin^2 \omega \sin \varphi] \quad (8)$$

$$\det(S) = \cos^2 \omega \cos^2 \varphi + \sin^2 \omega \cos^2 \varphi + \sin^2 \varphi = \cos^2 \varphi + \sin^2 \varphi = 1.$$

Poglejmo še, kakšne vrednosti dobi matrika S za posebne primere zasukov in odklonov.

1. $\omega = 0$, $\varphi = 0$ in $\theta = 0$:

$$S = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = I.$$

Kar seveda pomeni, da ko plovilo (boja) ni zasukana in ne nagnjena, je transformacijska matrika enaka enotni matriki, kar pa z anemometrom izmerimo, je že v koordinatnem sistemu, katerega osi kažejo proti vzhodu, severu in pravokotno na gladino morja.

2. $\omega = \pi/4$, $\varphi = 0$ in $\theta = 0$:

$$S = \begin{pmatrix} \sqrt{2}/2 & \sqrt{2}/2 & 0 \\ -\sqrt{2}/2 & \sqrt{2}/2 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

kar ohranja vertikalno os (komponento) in za 45° zasuka izmerjene vrednosti horizontalnih komponent hitrosti anemometra.

3. $\omega = 0$, $\varphi = \pi/4$ in $\theta = 0$:

$$S = \begin{pmatrix} \sqrt{2}/2 & 0 & \sqrt{2}/2 \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sqrt{2}/2 & 0 & \sqrt{2}/2 \end{pmatrix}.$$

4. $\omega = 0$, $\varphi = 0$ in $\theta = \pi/4$:

$$S = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \sqrt{2}/2 & \sqrt{2}/2 \\ 0 & -\sqrt{2}/2 & \sqrt{2}/2 \end{pmatrix}.$$

V vseh štirih primerih je seveda ponovno $\det(S) = 1$.

2. Vedenje X-sens MTi merilnika zasuka in naklonov

Izvedli smo laboratorijska testiranja merilnika Xsens MTi (ID 00300527/0), ki je enakega tipa kot tisti, ki se nahaja na boji Vidi. Testiranja delovanja Xsens naprave so potekala tako, da smo postavili napravo na mizo, poleg nje pa vsaj še en kompas, s katerim smo usmerili Xsens napravo v grobem proti severu. Za tem smo tudi dodatno nagibali Xsens napravo in jo pustili v nagnjeni legi nekaj deset

sekund. S programsko opremo Xsens naprave pribl. vsake 0,1 s na zaslonu računalnika vidimo vrednosti odklona od severne smeri ('yaw'), vzdolžnega in prečnega naklona. Časovni potek navedenih podatkov se tudi grafično prikazuje s tremi različno obarvanimi črtami. Programska oprema omogoča zapisovanje meritev v *txt* datoteko, pri tem deset vrstic podatkov obsega časovni interval 1 s. Ker smo žal imena polj v *txt* datoteki spreminjali, smo s tem spremenili datum in uro ustvarjanja datoteke. Brez sprememb datoteka, ki jo ustvarimo z Xsens programsko opremo ima datum in uro nastanka, ki je enak datumu in uri zaključka meritev. Zaradi nerodnih sprememb v *txt* datoteki pa je v imenih datotek zapisana UTC ura kreiranja datotek.

Po vsaki namestitvi naprave smo naprej naredili fotografije namestitve Xsens naprave, nato smo poslikali zaslon, na koncu pa še zaključili s shranjevanjem merjenih podatkov v datoteko. Na Sliki 1 je prikazana osnovna namestitev Xsens naprave.



Slika 1. namestitev Xsens naprave med dva kompasoma. Na napravi je označena daljša os *X*, ki je pribl. usmerjena proti severu, ni 'odklona'. Zato je $yaw = 0$, vendar tudi velja $pitch = roll = 0$, saj Xsens ni nagnjen in ne naklonjen.

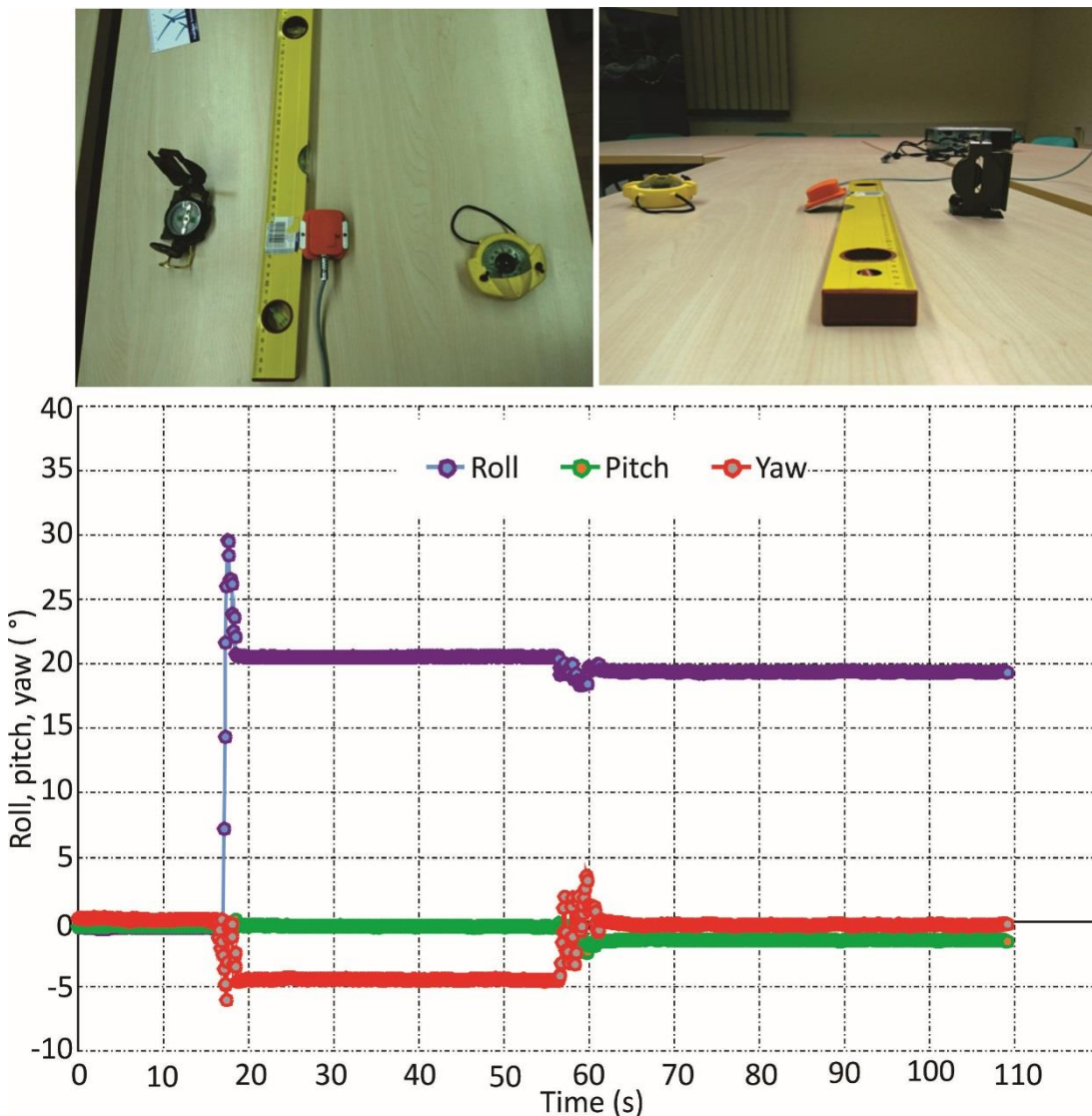
Xsens napravo smo težko uglasili po smeri z dvema dodatnima kompasoma. Poiskati smo morali lego na mizi s čim manj magnetnimi motnjami (mize imajo železne noge in železno povezovalno ogrodje). Poleg tega smo opazili, da so se naprave med seboj zaznavno motile, če so bile med njimi razdalje manjše od 20 cm, 'magnetne igle' so se sukale ena proti drugi. Kljub težavam smo zaključili, da MTi Xsens naprava ni bistveno odstopala od severne smeri, ko je bil $yaw = 0$ in da so bila odstopanja s severno smerjo navadnih kompasov $< 5^\circ$.

V grobem smo zajeli tri situacije/namestitve, ki jih bomo spodaj prikazali. Zato imajo datoteke slik in podatkov v glavnem skupna/podobna imena treh namestitev. Skupno ugotovitev testiranja kar na tem mestu zapišemo:

»Vsi merjeni koti so pozitivni, če jih reproduciramo s sukanjem desnosočnega vijaka, ki napreduje v smeri osi sukanja.«

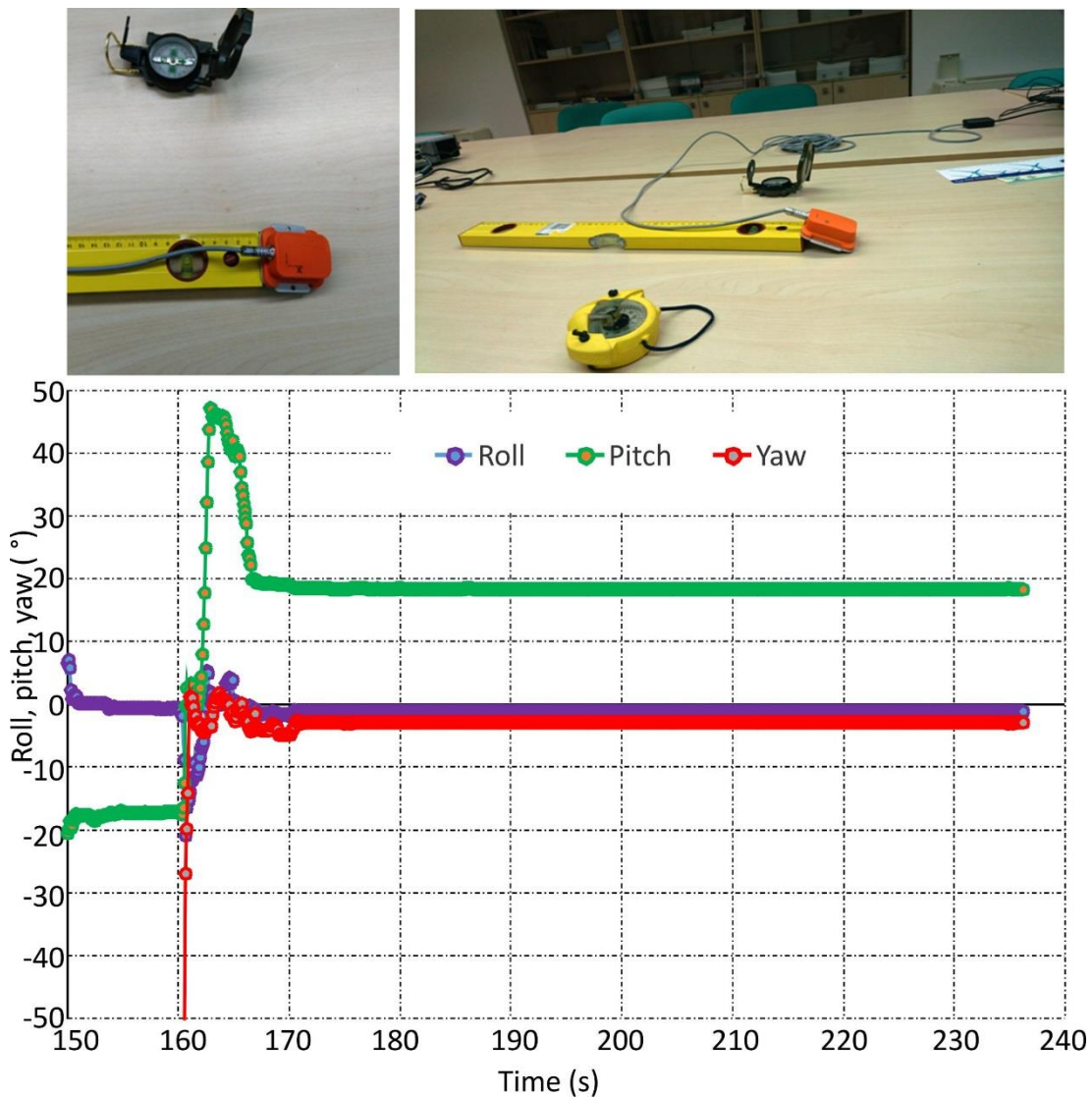
Razlikujemo tri tipe zasukov:

- »Roll« (oz. (prečni) nagib, 'valjanje'): Os X na MTi kompasu je vzdolž *daljše* stranice škatle. To smo na ohišju poudarili tako, da je vidna na slikah. Recimo, da je to os plovila, oz. os, ki povezuje oznako 'N' na obodu anemometra z osjo jamborja na boji Vidi. Naj je os X usmerjena proti SEVERU. Če je sprva Xsens na vodoravni podlagi in ga pričnemo sukati vzdolž X -osi, potem je $roll > 0$ takrat, ko je *desni bok* MTi kompasu (barke) *nižji od levega boka*, kar se doseže s sukanjem 'desnega' vijaka, ki je usmerjen vzdolž X osi. Pri tem predpostavimo, da je vzdolžni naklon barke enak nič (kljun barke ni višji od krme). V nasprotnem primeru moramo narediti *projekcijo vzdolžne osi X na vodoravno ravnino* in si predstavljamo sukanje naprave okoli te nadomestne vodoravne osi. Na Sliki 2 je prikazana orientacija Xsens naprave pri $roll > 0$.



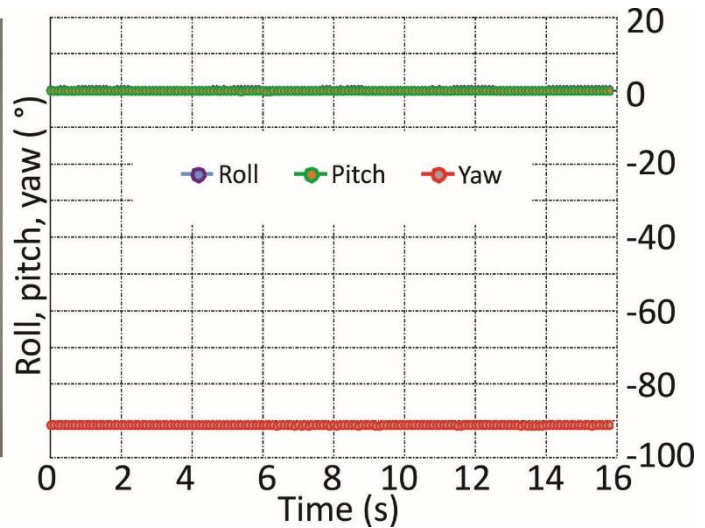
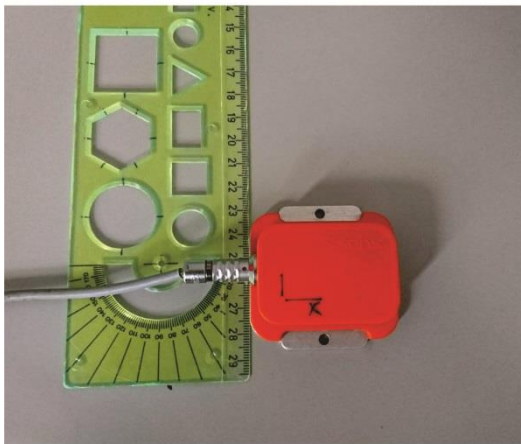
Slika 2. Namestitev Xsens kompasu, pri kateri so se vrednosti ustale na $roll = 19,3^\circ$, $pitch = -1,5^\circ$ $yaw \cong 0$.

- »Pitch« (oz. (vzdolžni) naklon): Tako je poimenovanje sukanje vzdolž osi Y (krajša stranica MTi kompasu). Os Y prebada Xsens napravo, oz. plovilo in seka vzdolžno os plovila pod pravim kotom. $Pitch$ bo > 0 , če bo *kljun barke* (ki recimo, da kaže proti severu, ni pa nujno), *nižji od krme*, če sta bila sprva oba enako visoka in zveznica med njima vzporedna z gladino morja. Na Sliki 3 je prikazana postavitve:



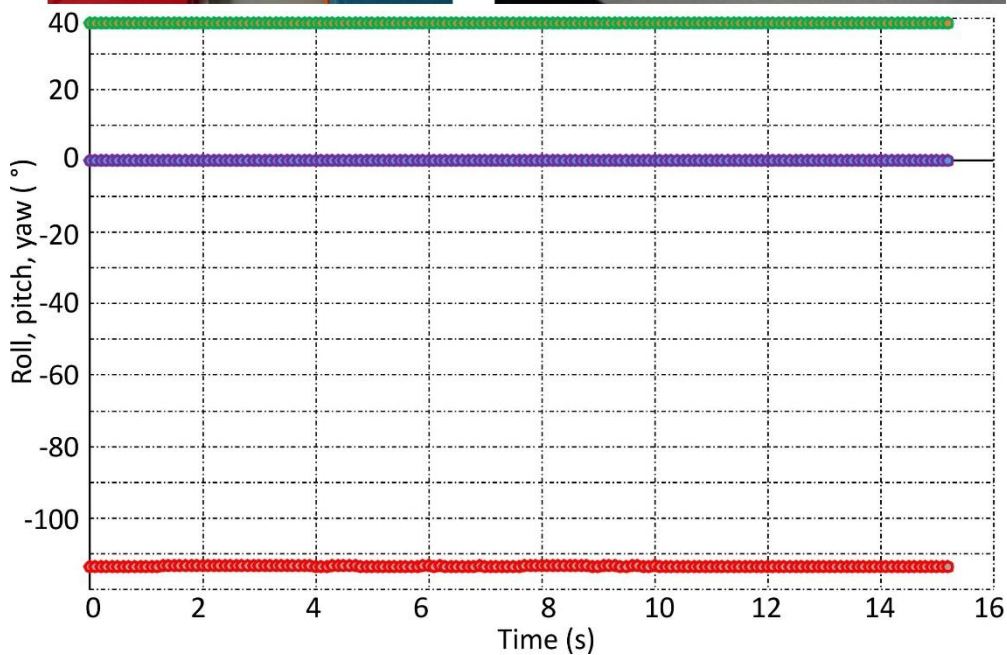
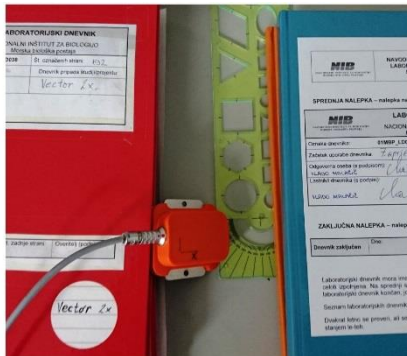
Slika 3. Prikaz postavitve Xsens kompasa, ko je naklon $pitch = +18,2^\circ$ in sta nagib $roll \cong 0^\circ$ in odklon $yaw = -3,0^\circ$.

- »Yaw« (odklon (od prvotne, oz. severne smeri)): ponovno velja pravilo desnega vijaka: Če je bil npr. kompas sprva usmerjen proti severu (os X kaže *proti severu*), je $yaw = 0$. Ko smo zasukali os X za pribl. *pravi kot* (85°) v levo, gledano od zgoraj navzdol na Xsens, to ustreza sukanju desnosučnega vijaka vzdolž Z -osi, ki kaže *navzgor*. Če se odklon od prvotne smeri reproducira s sukanjem desnosučnega vijaka in če ta napreduje *navzgor*, je tedaj zasuk $yaw > 0$. Gledano od zgoraj to pomeni zasuk *v levo, proti zahodu*, če je sprva bila Xsens X -os usmerjena proti severu. Ko kaže Xsens X -os proti zahodu, je $yaw = +90^\circ$! Tedaj je azimut Xsens naprave = 270° stopinj. Če bi Xsens kazal proti vzhodu (njegova X -os), je $yaw = -90^\circ$, azimut pa $+90^\circ$. Na Sliki 4 je lega Xsens naprave, ko je usmerjena proti vzhodu.



Slika 4. Nastavitev Xsens kompas, ko je usmerjen proti vzhodu (levo), oz. njegova daljša (x) os. Ravnilo je usmerjeno proti severu. tedaj je bil $yaw = -91^\circ$, $pitch = roll = 0^\circ$ (slika desno).

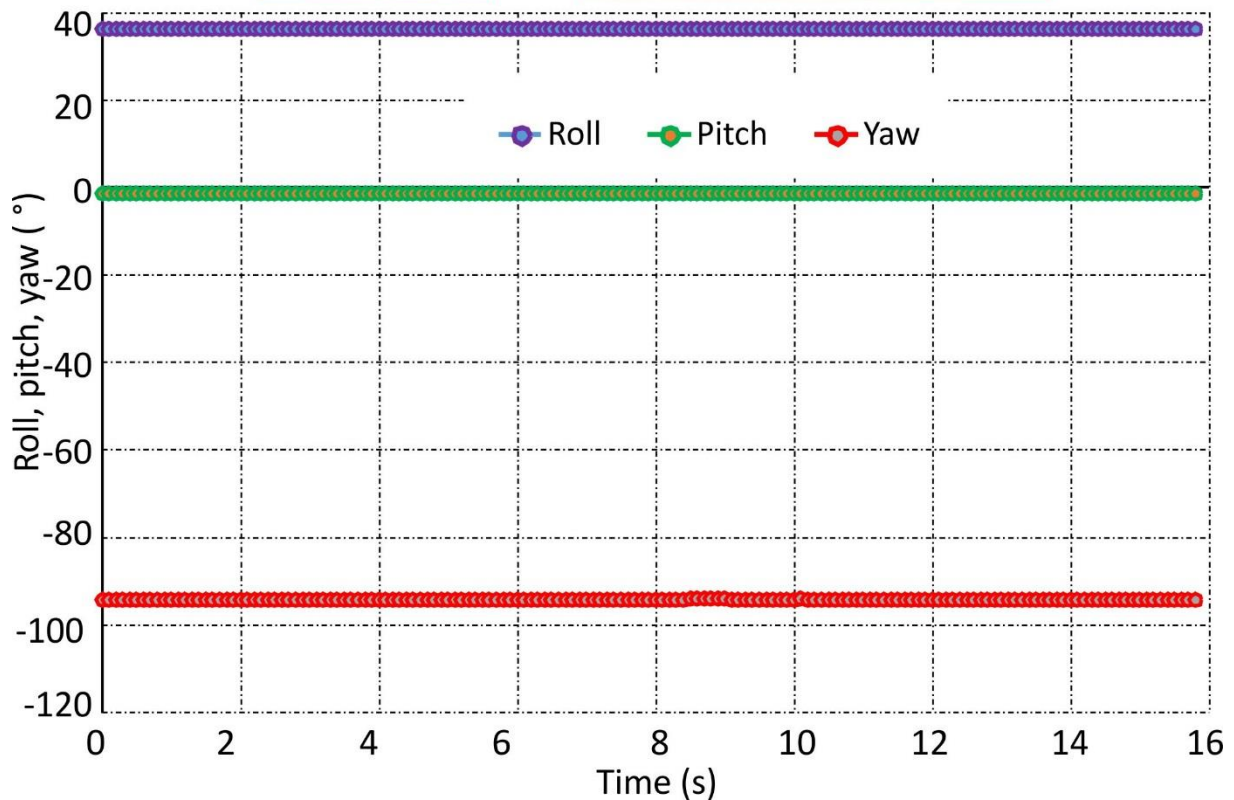
Oglejmo si še malo zahtevnejše postavitve Xsens instrumenta. Na Sliki 5 je prikazana lega Xsens instrumenta, ko je instrument 'naprej nagnjen', $pitch = +38^\circ$ in je $yaw = -113^\circ$, v grobem je instrument (njegova x-os) usmerjen proti vzhodu (vzhod-jug-vzhod).



Slika 5. Postavitev Xsens instrumenta z naklonom $pitch = +38^\circ$ in odklonom $yaw = -113^\circ$.

Zaključimo še s prikazom postavitve Xsens instrumenta na Sliki 6, ko je nagib $roll = 36^\circ$ in je odklon $yaw = -94^\circ$.

Ik



Slika 6. Postavitev Xsens instrumenta, ko je bočno naklonjen za $roll = 36^\circ$ in je odklonjen od severne smeri proti vzhodu za $yaw = -94^\circ$.

Pomembno je dejstvo, da zgoraj opisano vedenje Xsens MTi merilnika bistveno odstopa od elektronskih kompasov, ki so predhodno delovali na oceanografski boji, v obdobju do leta 2004 oz. 2005 (Anon., 1999), ko je bil instaliran drugi kompas (Anon., 2004) do leta 2007-2008. Predhodna kompasna sta imela predolg odzivni čas za opazovanje nihanj na boji, kar ne velja za Xsens merilnik, vendar sta bila namenjena navigaciji in je bil zato njihov izhod pravi azimut, oz. 'heading'.

3. Transformacijska matrika za Xsens MTi merilnike

Na boji Vidi in v laboratoriju imamo Xsens MTi merilnika (tisti v lab. ima ID 00300527/0), sledili smo sicer priročniku (Anon., 2016) za novejšje modele (MTi User Manual, Document MT0605P.I, v datoteki MTi_usermanual.pdf) od tistih, ki sta bila kupljena okoli leta 2008, katerih uporabniški priročnik (Anon., 2008) smo tudi pregledali. Najprej zapišimo definicije kotov zasukov, ki jih proizvajalec (Anon., 2016) uporablja (str. 37):

- $\psi = 'yaw'$, rotacija, okoli z-osi (os, pravokotna na zemeljsko površje, usmerjena proti nebu), oz. odklon od prvotne (severne) smeri. Ta je lahko tudi enaka 'heading' (ω), oz. azimutu, ni pa nujno temu tako.
- $\theta = 'pitch'$, oz. *naklon* vzdolžne osi naprave/plovila glede na horizontalno ravnino, je rotacija okoli y'-osi, ki je trenutna y-os po prvi (predhodni) rotaciji za azimut.
- $\varphi = 'roll'$, oz. *prečni nagib*, oz. zasuk okoli x"-osi, to je trenutne x-osi, izveden po predhodnih dveh rotacijah. Čeprav sta oznaki poslednjih dveh količin enaki, kot smo ju predhodno uporabili, pa iz definicije sledi, da je npr. za 'roll' potrebno imeti že predhodno izvedeno rotacijo za 'pitch'. Na str. 29 navedenega priročnika sta tudi zapisani definiciji za 'yaw' in 'heading':

»Heading is defined as the angle between north and *horizontal* projection of the vehicle *roll* axis. Yaw is defined for a particular local-level navigation frame as the *angle from a horizontal navigation axis to the projection of the longitudinal axis* in the horizontal plane following the right-hand rule. Based on the definition of heading and yaw, consider the use of the MTi in an aircraft which is stationary and pointing north...« Vendar so testiranja rezervne enake naprave v laboratoriju so pokazala, da vsi *zasuki naprave sledijo pravilu desnosučnega vijaka*: zasuk je pozitiven, ko zasukamo napravo v desno, pri čemer bi desnosučni vijak *lezel v smeri osi* sukanja. V primeru sukanja naprave okoli vertikalne (z), je $\psi > 0$ pri zasuku v desno, ko navidezni desnosučni vijak leze navpično navzgor, normalno na horizontalno podlago. To pa je ravno v nasprotni smeri azimutnega kota.

Na str. 38 navedenega priročnika (Anon., 2016) najdemo zapisano rotacijsko matriko R_{LS} , s pomočjo katere naj bi zasukali koordinatni sistem vezan na senzor/instrument (S) v koordinatni sistem globalni referenčni koordinatni sistem (L), t.j. NEZ (North-East-Z) pri nas (x-os proti severu, y-os proti zahodu, z-os pa navpično navzgor), zapisan kot produkt treh zaporednih matrik zasukov:

$$R_{LS} = R_{\psi}^Z R_{\theta}^Y R_{\varphi}^X = \begin{pmatrix} \cos \psi & -\sin \psi & 0 \\ \sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \theta & 0 & \sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta & 0 & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \varphi & -\sin \varphi \\ 0 & \sin \varphi & \cos \varphi \end{pmatrix} \quad (9)$$

$$R_{LS} = \begin{pmatrix} \cos \theta \cos \psi & \sin \varphi \sin \theta \cos \psi - \cos \varphi \sin \psi & \cos \varphi \sin \theta \cos \psi + \sin \varphi \sin \psi \\ \cos \theta \sin \psi & \sin \varphi \sin \theta \sin \psi + \cos \varphi \cos \psi & \cos \varphi \sin \theta \sin \psi - \sin \varphi \cos \psi \\ -\sin \theta & \sin \varphi \cos \theta & \cos \varphi \cos \theta \end{pmatrix}.$$

Še nekaj: vektor lege v globalnem (L) koordinatnem sistemu x_L se pridobi iz vektorja x_S z zapisanimi komponentami v koordinatnem sistemu senzorja (S) s pomočjo rotacijske matrike (9) kot:

$$\mathbf{x}_L = \mathbf{R}_{LS} \mathbf{x}_S$$

$$\begin{bmatrix} x_L \\ y_L \\ z_L \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta \cos \psi & \sin \varphi \sin \theta \cos \psi - \cos \varphi \sin \psi & \cos \varphi \sin \theta \cos \psi + \sin \varphi \sin \psi \\ \cos \theta \sin \psi & \sin \varphi \sin \theta \sin \psi + \cos \varphi \cos \psi & \cos \varphi \sin \theta \sin \psi - \sin \varphi \cos \psi \\ -\sin \theta & \sin \varphi \cos \theta & \cos \varphi \cos \theta \end{pmatrix} \begin{bmatrix} x_S \\ y_S \\ z_S \end{bmatrix}. \quad (10)$$

Primerjava s predhodnim konceptom rotacij pravi, da je $\mathbf{R}_{SL} = \mathbf{APR}$ (= 'Azimuth*Pitch*Roll'), pravilneje pa celo \mathbf{YPR} (= 'Yaw*Pitch*Roll'), kar odstopa od predhodne \mathbf{ARP} transformacije po (5). Prav tako velja, da je inverzna transformacija, ki z rotacijami prevede globalni (zemeljski) kooordinatni sistem (L) v lokalnega, vezanega na senzor (S), zgolj transponirana matrika (9):

$$\mathbf{R}_{SL} = (\mathbf{R}_{LS})^T \quad (11)$$

Kar je značilnost rotacijskih matrik. Zapišemo še \mathbf{R}_{SL} z matričnimi elementi:

$$\mathbf{R}_{SL} = \begin{pmatrix} \cos \theta \cos \psi & \cos \theta \sin \psi & -\sin \theta \\ \sin \varphi \sin \theta \cos \psi - \cos \varphi \sin \psi & \sin \varphi \sin \theta \sin \psi + \cos \varphi \cos \psi & \sin \varphi \cos \theta \\ \cos \varphi \sin \theta \cos \psi + \sin \varphi \sin \psi & \cos \varphi \sin \theta \sin \psi - \sin \varphi \cos \psi & \cos \varphi \cos \theta \end{pmatrix}. \quad (12)$$

V knjigi klasične mehanike (Goldstein, 1980) najdemo podrobno zapisano metodo Euler-jevih kotov v pogl. 4, kar se nahaja v tem poglavju tudi v novejši verziji knjige (Goldstein et al., 2001). Tam je jasno zapisano, da npr. matrika, ki opisuje rotacijo koordinatnega sistema v drugi sistem za določen kot v nasprotni smeri urnega kazalca, lahko hkrati pomeni zasuk vektorja v enakem koordinatnem sistemu za enak kot vendar v smeri urnega kazalca (str. 136 (Goldstein, 1980), oz. str. 142 (Goldstein et al., 2001)). V dodatku B navedene knjige (str. 609 (Goldstein, 1980), oz. str. 603 (Goldstein et al., 2001)) je zapisana rotacijska matrika A za t. i. xyz sistem, ki prevede sistem *vezan na zemeljski koordinatni sistem* (L , oz. ENU, ali NWU) v *sistem telesa naprave* (S , oz. (""))¹:

$$A = \begin{pmatrix} \cos \theta \cos \varphi & \cos \theta \sin \varphi & -\sin \theta \\ \sin \psi \sin \theta \cos \varphi - \cos \psi \sin \varphi & \sin \psi \sin \theta \sin \varphi + \cos \psi \cos \varphi & \sin \psi \cos \theta \\ \cos \psi \sin \theta \cos \varphi + \sin \psi \sin \varphi & \cos \psi \sin \theta \sin \varphi - \sin \psi \cos \varphi & \cos \psi \cos \theta \end{pmatrix},$$

¹ Dejstvo, da v Goldstein (1980) knjigi zapisana matrika A pomeni rotacijo iz globalnega (vesoljnega) koordinatnega sistema v sistem naprave ugotovimo iz branja na str. 147, kjer je zapisano, da $A^{-1} = A^T$ pomeni rotacijo iz telesnih koordinat v globalni (ali vesoljni) koordinatni sistem.

(13)

Kjer smo tukaj zaradi oznak v tem besedilu pisali grško črko ϕ oz. 'phi' kot φ in ne kot ϕ , kar je zapisano v knjigi. Po primerjanju oznak v priročniku XSENS, oz. izrazu (12) z izrazom v knjigi (13), vidimo, da velja:

$$\psi_{XSENS} = \varphi_{GOLD}; \quad \theta_{XSENS} = \theta_{GOLD}; \quad \varphi_{XSENS} = \psi_{GOLD}, \quad (14)$$

kjer smo s podpisi označili strokovni vir ('GOLD' je oznaka za avtorja knjige, Goldstein). Pozorna primerjava matrike A z matriko R_{LS} ob upoštevanju zgoraj zapisanih zamenjav oznak kotov v bistvu pomeni: $A = (R_{LS})^T$, kar je tudi pravilno. V knjigi je $A = BCD$, produkt treh rotacijskih matrik. Ker velja $A^T = R_{LS} = (BCD)^T = (CD)^T B^T = D^T C^T B^T$, torej velja:

$$\begin{aligned} A^T = R_{LS} &= R_{\psi}^Z R_{\theta}^Y R_{\varphi}^X = D^T C^T B^T \Rightarrow \\ R_{\psi}^Z &= D^T; \quad R_{\theta}^Y = C^T; \quad R_{\varphi}^X = B^T. \end{aligned} \quad (15)$$

Tako smo povezali transformacijsko matriko v obeh virih, seveda pa je potrebno tudi upoštevati zamenjavo oznak 1. Determinanta posameznih rotacijskih matrik je enaka 1, determinanta produkta matrik je enak produktu determinant posameznih matrik, zato je tudi $\det(R_{LS}) = 1$.

Na koncu primerjajmo dosedanje transformacijsko matriko S (5), ki se nahaja v programski kodi z matriko R_{LS} (9), ki jo je zapisal proizvajalec kompasa:

$$\begin{aligned} S &= \begin{pmatrix} \cos \omega \cos \varphi & \sin \omega \cos \theta - \cos \omega \sin \theta \sin \varphi & \cos \omega \cos \theta \sin \varphi + \sin \omega \sin \theta \\ -\sin \omega \cos \varphi & \sin \omega \sin \theta \sin \varphi + \cos \omega \cos \theta & \cos \omega \sin \theta - \sin \omega \cos \theta \sin \varphi \\ -\sin \varphi & -\sin \theta \cos \varphi & \cos \theta \cos \varphi \end{pmatrix} \\ R_{LS} &= \begin{pmatrix} \cos \theta \cos \psi & \sin \varphi \sin \theta \cos \psi - \cos \varphi \sin \psi & \cos \varphi \sin \theta \cos \psi + \sin \varphi \sin \psi \\ \cos \theta \sin \psi & \sin \varphi \sin \theta \sin \psi + \cos \varphi \cos \psi & \cos \varphi \sin \theta \sin \psi - \sin \varphi \cos \psi \\ -\sin \theta & \sin \varphi \cos \theta & \cos \varphi \cos \theta \end{pmatrix}. \end{aligned}$$

Odstopanja so kar velika. Recimo, da je 'yaw' ψ v matriki R_{LS} , ki je odklon od predvidene (severne) smeri, enak azimutu ω v S , še vedno iz podobnosti členov vidimo, da bi naj bila kota poleg tega imajo členi naklonov φ in θ zamenjana (člena v prvem stolpcu in tretji vrsti matrik). Vendar to ni 'gladko', saj člena v stolpcu in tretji vrsti matrik nakazujeta spremembo predznaka pri tej zamenjavi oznak, kot tudi člena v prvem stolpcu in drugi vrstici obeh matrik. Poleg tega imata člena v prvi vrsti in drugem stolpcu zamenjana predznaka, kar velja tudi za člena v drugi vrsti in tretjem stolpcu. Skratka, do sedaj (1. feb. 2017) je od leta 2008 dalje z vpeljavo Xsens kompasa v kodi transformacijska matrika $S = ARP$ zapisana kot:

```
521  function arp = MbpArp ( heading , roll , pitch )
      conrad = pi / 180 . 0 ;
523
      sin_om = s i n ( heading*conrad ) ;
525  cos_om = cos ( heading*conrad ) ;
```



```

sin_fi = sin ( roll*conrad ) ;
527 cos_fi = cos ( roll*conrad ) ;
sin_th = sin ( pitch*conrad ) ;
529 cos_th = cos ( pitch*conrad ) ;

531 arp = zeros ( 3 , 3 ) ;

533 arp ( 1 , 1 ) = cos_om * cos_fi ;
arp ( 1 , 2 ) = sin_om * cos_th - cos_om * sin_th * sin_fi ;
535 arp ( 1 , 3 ) = sin_om * sin_th + cos_om * cos_th * sin_fi ;
537 arp ( 2 , 1 ) = ( -1.0 ) * sin_om * cos_fi ;
arp ( 2 , 2 ) = cos_om * cos_th + sin_om * sin_th * sin_fi ;

539 arp ( 2 , 3 ) = cos_om * sin_th - sin_om * cos_th * sin_fi ;
541 arp ( 3 , 1 ) = ( -1.0 ) * sin_fi ;
arp ( 3 , 2 ) = ( -1.0 ) * sin_th * cos_fi ;
543 arp ( 3 , 3 ) = cos_th * cos_fi ;
endfunction

```

Potrebno je preveriti, kaj dobimo, če vrstice kode od 533 do 543 zamenjamo s spodnjimi, pri čemer pazimo, da namesto ψ ('psi') uporabljamo ω (omega):

```

533 arp ( 1 , 1 ) = cos_th * cos_om ;
arp ( 1 , 2 ) = sin_fi * sin_th * cos_om - cos_fi * sin_om ;
535 arp ( 1 , 3 ) = cos_fi * sin_th * cos_om + sin_fi * sin_om ;
537 arp ( 2 , 1 ) = cos_th * sin_om ;
arp ( 2 , 2 ) = sin_fi * sin_th * sin_om + cos_fi * cos_om ;

539 arp ( 2 , 3 ) = cos_fi * sin_th * sin_om - sin_fi * cos_om ;
541 arp ( 3 , 1 ) = ( -1.0 ) * sin_th ;
arp ( 3 , 2 ) = sin_fi * cos_th ;
543 arp ( 3 , 3 ) = cos_fi * cos_th ;

```

Po vzporednih izračunih z dosedanjo in novejšo pretvorbo bomo sprejeli odločitev o vpeljevanju spremembe kode v operativno delovanje.

4. Anemometer WindMasterPro

V priročniku za WindmasterPro (WindMaster-and-Windmaster-Pro-Manual.pdf) podjetja Gill Instrument (Anon., 2010), je na str. 6 na Sliki 2 narisana usmeritev treh komponent vetra v koordinatnem sistemu anemometra v konfiguraciji X1. V Upoabniškem priročniku (Šonc, 2016) je Šonc na str. 45 zapisal, da je anemometer res nastavljen v konfiguraciji X1, ki pomeni, da je 'os U naravnana v smeri severa'.

Točneje to pomeni naslednje: Recimo, da je oznaka na anemometru za severno smer ('North') usmerjena proti severu in da je anemometer vertikalni glede na povprečno morsko gladino ($\psi = \theta = \varphi = 0$), potem je hitrostna komponenta $U > 0$, kadar piha veter *proti severu* (iz južne smeri), komponenta $V > 0$, ko veter piha *proti zahodu* (iz vzhodne smeri) in komponenta $W > 0$, ko ima veter komponento navpično navzgor, vzdolž osi valjaste konstrukcije nosilca instrumenta. Na str. 23 priročnika (Anon., 2010) je tudi narisana lega oznake za severno smer. Torej: ko anemometer ni zasukan in ne nagnjen, komponenta U pomeni severno, V pa zahodno komponento vetra. Dodajmo, da je merilnik zasukov in naklonov XSens tako postavljen na dno jambora boje Vide v trupu boje, da meri zasuke in naklone anemometra, ki je postavljen na vrhu jambora. Iz izraza za R_{LS} v (9) vidimo, da R_{LS} postane enotna matrika, ko

$\psi = \theta = \varphi = 0$. Vektor hitrosti $V_{enz} = (V_n, V_e, V_z)^T$ v obliki stolpca sestavimo iz vektorja hitrosti nagnjenega in zasukanega anemometra $V_{uvw} = (U, V, W)^T$ s pomočjo 'korektnih' transformacije (9), oz. s pomočjo matrike (5), ki je bila v rabi.

5. Vzorčno testiranje rotacijskih matrik na podatkih

Za ovrednotenje smeri vetrov 'izmerjenih' na boji Vidi smo od agencije ARPA FVG pridobili podatke iz stolpa Paloma od leta 2008 do 2016, kateri se nahaja v osrednjem delu Tržaškega zaliva. Kompleksna večletna primerjalna analiza meritev (sprememba režima razlik smeri vetra) ne bo prikazana v tem poročilu, pač pa bo objavljena drugod. Za ovrednotenje rotacijskih matrik bo zadoščala uporaba rotacijskih matrik na kratkem vzorčnem nizu podatkov, za katerega pa tudi imamo vrednosti na stolpu Paloma.

Podatki stolpa Paloma (45° 37' 6" N, 13° 33' 55" E; <http://www.ts.ismar.cnr.it/node/84>), ki je pribl. 7,84 km oddaljen od Vide v smeri NNE so podani vsako uro, smeri vetrov pa so izmerjene le v 10 min intervalih pred polno uro, t. i. terminske vrednosti. Zapišimo v Tabeli 1 vrednosti, ki so izmerjene (oz. 'izračunane') na stolpu Paloma in na boji Vidi in so sinhronizirano zbrane v datoteki *Wind_Paloma_Vida.xlsx* za poslednjih nekaj ur delovanja stolpa Paloma pred izpadom delovanja slednjega dne 26. oktobra 2016:

Ura:min	$\langle \alpha_P \rangle_{10}$ (°)	$\langle V_P \rangle_{10}$ (m/s)	$\langle \langle \alpha_V \rangle_{10} \rangle$ (°)	$\langle \langle V_V \rangle_{10} \rangle$ (m/s)	$\langle \alpha_V \rangle_{30}$ (°)	$\langle V_V \rangle_{30}$ (m/s)
20:00	59	8,7	78	6,6	93	5,9
21:00	59	11,9	71	7,2	92	8,2
22:00	48	8,8	68	6,2	84	5,5

Tabela 1. Terminske vrednosti vetra izmerjene/izračunane na stolpu Paloma in na boji Vidi dne 26. oktobra 2016, ura je v UTC času. Kot α je azimut smeri vetra, iz katere piha, V pa jakost vetra. Podnapis 'P' pomeni stolp Paloma, 'V' pa Vido, 10 oz. 30 pa pomenita 10 min (terminsko) ali 30 min povprečje. Podatki za bojo Vido so izpisani iz baze 'post-procesiranih' podatkov. Meritve na stolpu Paloma so opravljene na višini 9 m nad morsk gladino, na Vidi pa na višini 5 m. Pomotoma so pri terminskih vrednostih narejena povprečja med sosednjima terminskima vrednostma ob polni uri in 30 min pred polno uro². Dodali smo še 30 min povprečja meritev na Vidi, pri katerih so smeri podvržene transformaciji z rotacijsko matriko. 30 min povprečja so narejena iz 30 min intervalov, ki se zaključijo s polno uro, zapisano v prvem stolpcu.

Kot je razvidno iz Tabele 1, je razlikovanje med terminskimi smermi vetra ob vetru, ki je na Palomi izmerjen kot veter iz ENE smeri (v grobem je burja) v vrednostih med 12° do 19°, pri čemer iz mnogo daljše statistike zanesljivo vemo, da prevladujejo vrednosti blizu zgornji vrednosti razlike v smeri, v grobem okoli 20°. Podrobna analiza programske opreme pa pokaže, da terminske vrednosti sploh niso podvržene transformaciji z rotacijsko matriko, kot to velja za 15 min in 30 min povprečja. Tabela prikazuje, da 30 min vrednosti smeri na Vidi 'obupno' odstopajo od 10 min smeri vetrov na stolpu Paloma, med 33° in 46°, kar govori v

² Napako smo opazili šele ob pisanju tega poročila, prepozno, da bi jo odpravili. Pregled terminskih (= 10 min povprečnih) vrednosti na Vidi vsakih 30 min pokaže, da so terminske vrednosti smeri ob burji večje od vrednosti na Palomi.

prid trditvi, da transformacija zelo verjetno ne deluje pravilno. S pravilno transformacijo bi se morala odstopanja v smeri zmanjšati glede na odstopanja brez transformacije, ne pa povečati. Kljub temu je potrebna previdnost v interpretaciji poslednje vrednosti na Palomi, saj lahko da je prišlo do okvare že med izvajanjem te meritve in ne po njej.

Za interval 21:00-23:00 UTC 26. oktobra 2016 smo o tudi izpis 'surovih' podatkov kompasa in anemometra na boji Vidi (*raw_compass_wind-20161026.xlsx*) iz tabele surovih vrednosti v podatkovni bazi. Vzorčenja obeh potekajo vsakih 0,1 s, vendar niso sinhronizirana. Zato smo z Matlab orodjem (skripta *make1savg.m*) naredili enosekundna povprečja vrednosti kompasa in anemometra (podatkovna datoteka *make1savg.mat*) in na teh podatkih testirali rotacijske matrike z drugo skripto (*transform.m*), katera najprej prebere vhodne (enosekundne) podatke.

V nadaljevanju bomo opisovali ovrednotenje rotacijskih matrik s proceduro *transform.m*. Slednja kliče funkciji *MbpVstat.m* (Dodatek A) za pretvorbo vetrov izmerjenih v lokalnem koordinatnem sistemu anemometra, ki je opredeljen s podatki kompasa, v stalen koordinatni sistem (NWU = 'North-West'up'). V tej skripti je zapisana rotacijska matrika dosedanje transformacije (5). Za transformacijo hitrosti vetra iz sistema anemometra v NWU z novo rotacijsko matriko (9) pa uporabimo klic funkcije *MbpVstatnew.m* (Dodatek A).

6. Metoda testiranja rotacijskih matrik na vzorčnih podatkih

V tem razdelku bomo opisali metodo testiranja/ovrednotenja rotacijskih matrik, ki je zapisana v Matlab skripti *transform.m*. V grobem razlikujemo naslednje načine testiranja:

1. Najprej opravimo povprečja vhodnih 1 s vrednosti anemometra in kompasa na dva 10 min intervala za dan 26-okt-2016, in sicer za interval 21:50:00-22:00:00 in 22:50:00-23:00:00. Po povprečju pa na terminskih podatkih opravimo rotacijo. Sem prenesemo del skripte, ki izvede povprečje za prvo terminsko vrednost, v zelenem so vpisani komentarji:

```
159 %%% 10 MIN TERMINSKO povprečje VHODNIH HITROSTI
160 %%% 26-Oct-2016 21:50:00-26-Oct-2016 22:00:00
161 yaw_term1 = mean(comnum1s(firstindmin50:firstindmin50+599,3)) % =yaw= 15.82°
162 pitch_term1 = mean(comnum1 s(firstindmin50:firstindmin50+599,2)) % = -1.94°
163 roll_term1 = mean(comnum1s(firstindmin50:firstindmin50+599, 1)) % = -4.72°
164 wnd_term1_U = mean(wndnum 1s(firstindmin50:firstindmin50+599,1 ));
166 wnd_term1_V = mean(wndnum 1 s(firstindmin50:firstindmin50+599,2));
166 wnd_term1_W = mean(wndnum1s(firstindmin50:firstindmin50+599,3)) % VERT. VHOD.
KOMP. Winp = 0.40 m/s
167 wnd_term1 = zeros(3,1);
168 wnd_term1(1) = wnd_term1_U; wnd_term1(2) = wnd_term1_V; wnd_term1(3) =wnd_term1_W;
169 wnd_term1_spd = sqrt(wnd_term1_U^2 + wnd_term1_V^2) % VHODNA Hitrost(2 komp.) =
5.77 m/s
170 % terminske hitrosti so izracunane na VEKTORSKI NACIN, (Vodopivec, str. 10, vrstice kode
251 259)
171 % najprej <> komponent, potem jakost in smer
172 wnd_term1_spd2 = sqrt(wnd_term1_U^2+wnd_term1_V^2+wnd_term1_W^2) % ocena vpliva
W: VHODNA Hitrost(3 komp.) = 5.78 m/s
173 wnd_term1_dir = 90 + atan2(wnd_term1_U,wnd_term1_V)*180/pi;
174 if (wnd_term1_dir < 0)
```

```

176 wnd_term1_dir = wnd_term1_dir + 360;
176 elseif (wnd_term1_dir > 360)
177 wnd_term1_dir = wnd_term1_dir - 360;
178 end
179 wnd_term1_dir % VHODNA Smer vetra = 69.49°

```

V vrstici 169 smo izračunali 'jakost' vetra wnd_term1_spd iz dveh vhodnih komponent, v vrstici 172 pa jakost wnd_term1_spd2 iz treh vhodnih komponent. Na srečo se sprememba v jakosti pozna le na tretjem decimalnem mestu (glej komentarje), čeprav vertikalna vhodna komponenta predstavlja skorajda 10 % jakosti (komentar v vrstici 166 $W_{inp} = 0,40$ m/s). Poleg tega smo v vrsticah 173-179 izračunali tudi 'vhodno' (=vhodni podatek za izvedbo rotacije) smer vetra (= smer, iz katere veter piha), tako, kot se nahaja v Octave kodi (Vodopivec 2015, prej Vodopivec 2010 in še prej Petelin (2002)). Terminalska smer vetra brez rotacije je videti razumno, vendar ni pravilna, kot bo kasneje obravnavano. Ne smemo pozabiti, da je zasuk boje okoli vertikalne osi (vrstica kode 161) precej velik $yaw_term1 = 15,8^\circ$. Poleg tega smo 'vhodno'smer izračunali le iz dveh komponent ($U = V_{north}$ in $V = V_{west}$), kar ni popolnoma pravilno, saj je boja tudi nagnjena ($roll_term1 = -4,7^\circ$). Razlikujemo tri načine uporabe rotacijske matrike:

- a. 'STAROSTARO': pri tem načinu uporabimo *staro* (od leta 2002 dalje uporabljeno) metodo klica *stare* rotacijske matrike (5). V osnovi gre za najprej izračun vhodne jakosti vetra in smeri, oboje izračunano iz prvih dveh komponent meritev (U in V) v prej opisanih vrsticah skripte. Temu sledi:

```

185 %%%% TRANSFORMACIJA TERMINSKIH VREDNOSTI ZA 26-Oct-2016 21:50:00-26-Oct-2016
185 22:00:00
186 vinp_term1_old = zeros(3,1);
187 % STARA TRANSFORM. MATRIKA & STARI PRISTOP KTRANSFORMACIJI z W = 0
188 %%% 26-Oct-2016 21:50:00-26-Oct-2016 22:00:00
189 vinp_term1_old(1) = wnd_term1_spd*cos((270 - wnd_term1_dir)*pi/180); % % %
190 vinp_term1_old(2) = wnd_term1_spd*sin((270 - wnd_term1_dir)*pi/180);
191 vinp_term1_old(3) = 0; % Tako je v Octave proceduri
192 vinp_term1_old
193 vs_term1_old = MbpVstat(vinp_term1_old,yaw_term1, roll_term1, pitch_term1)
194 scVmSpd_term1_old = sqrt(vs_term1_old(1)^2 + vs_term1_old(2)^2) % STAROSTARO Winp =
194 0, Hitrost(2 komp.) = 5.74 m/s
195 scW_term1_old = vs_term1_old(3) % STAROSTARO, Winp = 0, Wout = Vz = -0.51 m/s
196 scVmDir_term1_old = 270 - atan2(vs_term1_old(2),vs_term1_old(1))*180/pi; % Vodopivec 2015
196 str. 14, vrsta kode 407
197 if (scVmDir_term1_old < 0)
198   scVmDir_term1_old = scVmDir_term1_old + 360;
199 elseif (scVmDir_term1_old > 360)
200   scVmDir_term1_old = scVmDir_term1_old - 360;
201 end
202 scVmDir_term1_old % STAROSTARO, Winp = 0, Smer vetra = 85.23°

```

V vrsticah 189-190 je vidna transformacija v komponente vetra, kamor (horizontalni) vektor vetra kaže vetra, pri čemer je vertikalna komponenta vhodnega vetra enaka nič (vrstica 191). Takšen vhodni vektor nato rotiramo s transformacijsko matriko s klicem funkcije *MbpVstat* (Dodatek A). Po transformaciji pridobimo jakost vetra $scVmSpd_term1_old$ (=5,77 m/s), vhodna hitrost je bila ali 5,78 (dve komponenti uporabljeni), oz. 5,79 (tri komponente). Vimenu 'sc' pomeni 'statično korekcijo'. Pri rotaciji se jakost vektorja mora ohranjati. Po rotaciji tudi izračunamo smer vetra, iz

katere piha v vrstici 196, pri čemer je potrebna previdnost pri uporabi atan2 funkcije, s katero se deli druga (po rotaciji severna) komponenta rotiranega vektorja s prvo (vzhodno) komponento. Pri določitvi smeri vhodnega vektorja vetra smo delili prvo komponento (severno) z drugo in namesto kota 270° je nastopal kot 90°, ki smo ga prišteli atan2 funkciji. Povzamemo: Smer vetra po transformaciji dobi napačno vrednost preko 85° (vrstica 202).

- b. 'STARONOVO': pri tej metodi uporabimo stari pristop uporabe rotacijske matrike, le da staro matriko po (5) zamenjamo z novo (9):

```
204 % STARI PRISTOP IN NOVA TRANSFORM. MATRIKA z W = 0:

205 %%% 26-Oct-2016 21 :50:00 - 26-Oct-2016 22:00:00
206 vs_term1new= MbpVstatnew(vinp_term1_old, yaw_term1, roll_term1, pitch_term1)
207 scVmSpd_term1new = sqrt(vs_term1new(1)^2 + vs_term1new(2)^2) % STARONOVO, Hitrost(2
komp.) = 5.77 m/s
208 scW_term1new = vs_term1new(3) % STARONOVO, VERT. KOMP. (Winp = 0), Wout = Vz = -
0.017 m/s
209 scVmDir_term1new = 270- atan2(vs_term1new(2),vs_term1new(1))*180/pi; % Vodopivec 2015
str. 14, vrsta kode 407
210 if (scVmDir_term1new < 0)
211   scVmDir_term1 new = scVmDir_term1 new+ 360;
212 elseif (scVmDir_term1new > 360)
213   scVmDir_term1 new= scVmDir_term1 new - 360;
214 end
215 scVmDir_term1new % STARONOVO, Winp = 0, Smer vetra(2 komp.) = 53.75°
```

Klic funkcije nove rotacijske matrike *MbpVstatnew* je izveden v vrstici 206. Tokrat so rezultati bistveno boljši: Kljub uporabi zgolj dveh vhodnih komponent vetra ($vinp_term1_old(3) = W_{inp} = 0$), je vertikalna komponenta vetra po rotaciji manjša od 0,02 m/s (komentar v vrstici 207), medtem ko je smer vetra, od koder piha, zmanjšana na 54°. Vendar smo uporabo rotacijske matrike izvedli nekorektno, saj je bila vhodna vertikalna komponenta hitrosti enaka nič.

- c. 'NOVONOVO': uporabimo enostavnejši, novi pristop uporabe nove rotacijske matrike (9):

```
216 %%%NOVI PRISTOP IN NOVA TRANSFORMACIJSKA MATRIKA
217 %%% NEPOSREDNA TRANSFORMACIJA IZVORNIH UVW 10 min TERMINSKIH HITROSTI
218 %%% 26-Oct-2016 21:50:00-26-Oct-2016 22:00:00
219 %%% W input<> 0, v TRANSFORMACIJI UPORABIMO wnd_term1 =
(wnd_term1_U,wnd_term1_V, wnd_term1_W)'
220 NWU_term1 = MbpVstatnew(wnd_term1, yaw_term1, roll_term1, pitch_term1); %
221 scVmDirterm1 = 90 + atan2(NWU_term1(1),NWU_term1(2))*180/pi; % komponenta (1) ustreza
Unorth
222 if (scVmDirterm1 < 0)
223   scVmDirterm1 = scVmDirterm1 + 360;
224 elseif (scVmDirterm1 > 360)
225   scVmDirterm1 = scVmDirterm1 - 360;
226 end
227 scVmDirterm1 % NOVONOVO, W <> 0, Smer vetra = 53.68°
228 scVmSpdterm1 = sqrt(NWU_term1(1)^2+NWU_term1(2)^2+NWU_term1(3)^2) % NOVONOVO,
Hitrost(3 komp.) = 5.76 m/s
229 scW_term1 = NWU_term1(3) % NOVONOVO, Wout = Vz = -0.11 m/s
```

Tokrat smo se izognili predhodnim izračunom vhodnih komponent vetra, pri čemer smo najprej računali, od koder veter piha (vrstice 173-179) in za tem komponente 'kamor piha' (v ENU sistemu) v vrsticah 189-191, ampak smo v rotacijsko matriko neposredno vstavili 10-minutna povprečja izvornih U, V, W komponent nagnjenega in zasukanega anemometra (vrstica 220). Po rotaciji iz komponent vetra (NWU_term1) v NWU sistemu izračunamo smer vetra v vrsticah 221-227 (vrednost 54°), ki se na prvi decimalki razlikuje od smeri vetra izračunani po 'STARONOVO' metodi. Jakost hitrosti je izračunana iz vseh treh komponent (vrstica 228) vrednost 5,76 m/s in so razlike z metodo 'STARONOVO' vidne na drugi decimalki, medtem ko je vertikalna komponenta vetra od vhodne vrednosti 0.4 m/s (vrstica 166) znižana na vrednost -0.1 m/s (vrstica 229). Slednja vrednost ni zanemarljiva, vendar tudi ni tako pomembna. Kaže na problem 'šuma' meritev zasukov in naklonov Vide ter na pomanjkanje sinhronizacije teh meritev z meritvami anemometra.

2. Izvedba rotacije v koordinatni sistem NWU iz sistema anemometra na 1 s podatkih anemometra s pomočjo 1 s podatkov zasukov in naklonov kompasa. Rotaciji sledi povprečenje, sicer poljubno (npr. 120 min), vendar je na tem mestu pomembno 10 minutno povprečenje na terminskih vrednostih za dva termina: 20:50 – 21:00 in 21:50 – 22:00. Kopirajmo segment kode, ki izračuna rotacijo vektorjev hitrosti na 1 s podatkih:

```

108 %%% NEPOSREDNA TRANSFORMACIJA IZVORNIH UVW ENOSEKUNDNIH HITROSTI
109 %%% V DVEURNEM INTERVALU 26-0ct-2016 21:00:00 -26-0ct-2016 23:00:00
110 for ii= 1 :row1s
111   heading= comnum1s(ii,3); % =yaw!
112   pitch = comnum1s(ii,2); %
113   roll = comnum1s(ii,1); %
114   UVW(1 :3) = wndnum1s(ii,1 :3);
115   NWU1s_new2(ii,1:3) = MbpVstatnew(UVW,heading,roll,pitch); %
116   scVmDir1snew2(ii) = 90+atan2(NWU1s_new2(ii,1),NWU1s_new2(ii,2))*180/pi;
117   if (scVmDir1snew2(ii) < 0)
118     scVmDir1snew2(ii) = scVmDir1snew2(ii) + 360;
119   elseif (scVmDir1snew2(ii) > 360)
120     scVmDir1snew2(ii) = scVmDir1snew2(ii) - 360;
121   end
122   scVmSpd1snew2(ii) =
sqrt(NWU1s_new2(ii,1)^2+NWU1s_new2(ii,2)^2+NWU1s_new2(ii,3)^2);
123   NWU1s_arp(ii,1:3) = MbpVstat(UVW, heading, roll, pitch); %
124 end

```

Zapišimo, da spremenljivka row1s pomeni število 1 s podatkov od 20:00 do 23:00 in da smo pač izvedli transformacijo izvornih 1 s komponent vetra na celotnem vzorčnem nizu surovih podatkov s klicem funkcije MbpVstatnew v vrstici 115. v vrsticah 116-121 smo izračunali 1 s smeri vetra, v vrstici 122 jakost vetra iz vse treh komponent rotiranih hitrosti. V vrstici 123 pa smo uporabili klic stare rotacijske matrike. Razlikujemo uporabo:

- d. 10 min povprečja po klicu nove rotacijske matrike (9):

```

300 %%% NEPOSREDNI IZRACUN, 10 MIN TERMINSKO povprecje ENOSEKUNDNIH IZVORNIH
    IN TRANSFORMIRANIH HITROSTI
301 %%%26-0ct-2016 21:50:00-26-0ct-2016 22:00:00 %%% IZKORISTI 1 s IZRACUNE
    ZNOTRAJ ZANKE ZA 2 h INTERVAL

```


302 term1ScVmDirnew2 = mean(scVmDir1snew2(firstindmin50:firstindmin50+599)) % = prva terminska vrednost VmDir = 53.73°
 303 stdterm1ScVmDirnew2 = std(scVmDir1snew2(firstindmin50:firstindmin50+599)) % = 6.39°
 304 term1ScVmSpdnew2 = mean(scVmSpd1snew2(firstindmin50:firstindmin50+599)) % = prva terminska vrednost VmSpd = 5.80 m/s
 305 stdterm1ScVmSpdnew2 = std(scVmSpd1snew2(firstindmin50:firstindmin50+599)) %= 0.87 m/s
 306 %%% terminske VERTIKALNE komponente vetra 1s podatkov in transformiranih podatkov za 26-Oct-2016 21: 50:00 - 26-Oct-2016 22:00:00
 307 term1Win = mean(wndnum1s(firstindmin50:firstindmin50+599,3)) % prva terminska vhodna W = 0.40 m/s
 308 term1Wou = mean(NWU1s_new2(firstindmin50:firstindmin50+599,3)) % prva terminska izhodna W = - 0.13 m/s
 309 %%% tudi terminsko vrednost vertikalne komponente W smo s transformacijo zbili, nismo je izničili %%%

Izvedba rotacije na 1 s podatkih in kasnejše povprečevanje na 10 min interval je pravilnejši postopek izvedbe transformacije, vendar je tudi računalniško potraten. Pri obravnavanju mase sprejetih podatkov iz boje Vide je potrebno izvesti izračune čim hitreje, da so post-procesirane količine dovolj hitro umeščene v podatkovno relacijsko bazo, saj iz slednjih izvajamo še številne grafične 'on-line' predstavitve podatkih in izpise. Primerjava te metode z metodo c. 'NOVONOVO', ki bo zbrana v tabeli, kaže, da razlike v vrednostih niso zaznavne. Tako smo za vertikalno komponento hitrosti pridobili vrednost -0,13 m/s (vrstica 308), prej pa smo imeli -0,11 m/s. 10 min povprečna vrednost hitrosti postane 5,80 m/s (vrstica 304), v metodi c. pa je bila 5,76 m/s, tudi terminska smer se razlikuje na drugi decimalki (53,68° proti 53,73°), ki je upravičeno zaokrožena na enako celo vrednost 54°.

7. Rezultati testiranja rotacijskih matrik na vzorčnih podatkih

Opustili smo opis rezultatov 10 min povprečja po klicu stare rotacijske matrike na 1 s podatkih. Zberimo v Tabeli 2 najprej vhodne terminske vrednosti:

Ura:min UTC	$\langle \psi \rangle_{10}$ (°)	$\langle \theta \rangle_{10}$ (°)	$\langle \varphi \rangle_{10}$ (°)	$\langle \alpha_{IN} \rangle_{10}$ (°)	$\langle W_{IN} \rangle_{10}$ (m/s)	$\langle V_{IN2D} \rangle_{10}$ (m/s)	$\langle V_{IN3D} \rangle_{10}$ (m/s)
21:50-22:00	15,82	-1,94	-4,72	69,49	0,40	5,77	5,78
22:50-23:00	15,40	-1,84	-4,64	71,89	0,60	7,77	7,79

Tabela 2. Vhodne vrednosti pri rotaciji v NWU sistem in izračunavanju smeri ter jakosti vetra. $\langle \psi \rangle_{10}$ pomeni 10 min (terminsko) povprečje 'yaw' odmika od severne smeri v smeri proti zahodu, podobno velja za vzdolžni $\langle \theta \rangle_{10}$ in prečni $\langle \varphi \rangle_{10}$ naklon boje. $\langle \alpha_{IN} \rangle_{10}$ je 'smer' vetra ocenjena iz dveh komponent (U , V) meritev vetra brez upoštevanja zasuka in naklonov boje, $\langle W_{IN} \rangle_{10}$ pomeni vhodno 'vertikalno' komponento W izmerjene hitrosti, ki gleda navzgor v smeri nagnjenega anemometra na boji. $\langle V_{IN2D} \rangle_{10}$ in $\langle V_{IN3D} \rangle_{10}$ sta jakosti vetra izračunani iz dveh oz. treh izmerjenih komponent.

Odklon od severne smeri je večji od 15°, kar smo že omenili, prečni naklon pa večji od 4,5°, 'vertikalna' 10 min komponenta hitrosti je vsaj 0,4 m/ in predstavlja vsaj 60 % vrednosti jakosti vetra v danem terminu. Sedaj pa še zapišimo zbrane rezultate v Tabelo 3, kjer pa zapišemo od jakosti enkrat izračunane iz dveh komponent, drugič iz treh, pač odvisno od

metode uporabe rotacijske matrike. Prehod iz ene jakosti v drugo je enostaven zaradi poznavanja tretje komponente, ki je zapisana v tabeli.

Tabela 3 kaže na neuporabnost do sedaj uporabljene rotacijske matrike (metoda a.) s stališča vertikalne komponente, ki je z rotacijo zanesljivo nismo zmanjšali. Vidimo, da je ta komponenta vetra najmanjša pri metodi b., vendar se moramo zavedati, da smo pri tej metodi za vhodno 'vertikalno' komponento vetra vstavili ničlo, kot pri metodi a.

Terminski interval	21:50-22:00				22:50-23:00			
Metoda	a.	b.	c.	d.	a.	b.	c.	d.
$\langle W_{OUT} \rangle_{10}$ (m/s)	-0,51	-0,02	-0,11	-0,13	-0,68	-0,04	-0,08	-0,09
$\langle V_{OUT2D} \rangle_{10}$ (m/s)	5,74	5,77	/	/	7,74	7,77	/	/
$\langle V_{OUT3D} \rangle_{10}$ (m/s)	/	/	5,76	5,80	/	/	7,76	7,85
$\langle \alpha_{OUT} \rangle_{10}$ (°)	85,23	53,75	53,68	53,73	87,22	56,56	56,49	56,71

Tabela 3. Rezultati testiranja dveh rotacijskih matrik po metodah a.-d., ki so opisane v besedilu. $\langle W_{OUT} \rangle_{10}$ pomeni vertikalno (10 min) komponento vetra, ki je pravokotna na morsko gladino, po izvedbi rotacije. $\langle V_{OUT2D} \rangle_{10}$ pomeni izhodno jakost vetra, izračunano dveh komponent vetra, iz severne in zahodne, medtem ko $\langle V_{OUT3D} \rangle_{10}$ vsebuje tudi tretjo vertikalno komponento. $\langle \alpha_{OUT} \rangle_{10}$ pomeni terminsko smer vetra, od koder piha.

Najpomembnejši rezultat testiranja rotacijskih metod se nahaja v poslednji vrstici Tabele 3. Vidimo, da je smer vetra pri (dosedanji) metodi a. v intervalu 85° - 87° , kar pomeni 'vzhodni' in ne 'severo-vzhodni' veter. Smeri vetrov po metodah b., c. in d. so si zelo podobne in med seboj ne odstopajo za več kot $0,2^{\circ}$ pri obeh terminih, medtem ko se je smer vetra od enega do drugega termina v eni uri spremenila za okoli 3° . Uvedba nove rotacijske matrike b. s kompliciranim pristopom predhodnega izračunavanja komponent ni korektna zaradi vpeljave vhodne 'vertikalne' komponente enake nič. Zahtevnejša metoda d. vpeljave rotacijske matrike na sekundnih podatkih s kasnejšimi povprečenji pa daje rezultate, ki od rezultatov po metodi c. odstopajo v okviru merskih napak ($0,1$ m/s pri jakosti in $0,2^{\circ}$ v smeri)

Primerjajmo zgornje vrednosti smeri vetra s tistimi, ki smo jih zapisali v Tabeli 1: Stolp Paloma je imel vrednost smeri vetra dvakrat vrednost 59° , enkrat 48° v triurnem intervalu. Vrednosti 54° oz. 57° sta temu najbližje, ostalo (stara metoda a) za več kot 25° odstopa. Lahko zaključimo, da je upravičen postopek enostavnejše uporabe transformacije izmerjenih vrednosti po metodi c., ki je lahko uporabljen na 10 min, 15 min, oz. 30 min povprečnih surovih vrednosti.

Dodatek A

Kopirajmo vrstice kode tako transformacije komponent vektorja hitrosti vetra iz njemu lastnega sistema, v katerem ima komponente hitrosti (U, V, W) v stalen koordinatni sistem NWU (=North-West-Up), ko z rotacijsko matriko pridobimo komponente (U_N, U_W, U_Z), kjer je U_N severna komponenta vektorja, U_W zahodna komponenta in U_Z komponenta, ki gleda navpično navzgor, pravokotno na morsko gladino. V primeru, da boja Vida ni odklonjena od severne smeri, brez naklona (=pitch) in brez nagiba (=roll), seveda velja, da je $(U, V, W) = (U_N, U_W, U_Z)$ in rotacijska matrika je tedaj enotni matriki I dimenzije 3×3 . Zavedajmo se, da komponente vektorja vetra, tako tiste v zasukanem/odklonjenem, nagnjenem in naklonjenem sistemu, kot v NWU sistemu, kažejo v smer, v katero veter piha.

Najprej prepíšemo funkcijo rotacije/transformacije s pomočjo do sedaj (marec 2017) veljavne matrike, ki je tudi zapisana v izrazu (5):

```
1 function [vstat] = MbpVstat(vinp,heading,roll,pitch)
2 % arp funkcija statične korekcije v Octave kodi programa za anemometer
3 conrad = pi/180;
4 sin_om = sin(heading*conrad);
5 cos_om = cos(heading*conrad);
6 sin_fi = sin(roll*conrad);
7 cos_fi = cos(roll*conrad);
8 sin_th = sin(pitch*conrad);
9 cos_th = cos(pitch*conrad);
10 % To poročilo Malačič, marec 2017, str. 2, formula (5) za matriko S. Tudi poročilo
11 % Vodopivec 2015 matrika A str. 4 formula (20) in poročilo Vodopivec 2010,
12 % str. 5 formula (20). Kodo je zapisal Damir Deželjin, pred njim pa od leta 2002 do 2007 Boris
13 % Petelin Petelin skripte vstat.m in vstatcorr. ter arp.m
14 arp = zeros(3,3);
15 arp(1,1) = cos_om*cos_fi;
16 arp(1,2) = -cos_om*sin_th*sin_fi + sin_om*cos_th;
17 arp(1,3) = sin_om*sin_th + cos_om*cos_th*sin_fi;
18 arp(2,1) = -sin_om*cos_fi;
19 arp(2,2) = cos_om*cos_th + sin_om*sin_th*sin_fi;
20 arp(2,3) = cos_om*sin_th - sin_om*cos_th*sin_fi;
21 arp(3,1) = -sin_fi;
22 arp(3,2) = -sin_th*cos_fi;
23 arp(3,3) = cos_th*cos_fi;
24 % arp
25 vstat = arp*vinp;
26 end
```

Zapišimo še funkcijo rotacije vektorja z izrazom (10) z novo matriko:

```
1 function [vstatnew] = MbpVstatnew(vinp,heading,roll,pitch)
2 % arp funkcija statične korekcije v Octave kodi programa za anemometer
3 % vsstatnew = zeros(3,1);
4 conrad = pi/180;
5 sin_om = sin(heading*conrad);
6 cos_om = cos(heading*conrad);
7 sin_fi = sin(roll*conrad);
8 cos_fi = cos(roll*conrad);
9 sin_th = sin(pitch*conrad);
10 cos_th = cos(pitch*conrad);
11 % To poročilo, Malačič, marec 2017, str. 4, formula (9) za matriko R_LS:
12 arpnew = zeros(3,3);
13 arpnew(1,1) = cos_th * cos_om ;
14 arpnew(1,2) = sin_fi * sin_th * cos_om - cos_fi * sin_om ;
```

```

15 arpnew(1,3) = cos_fi * sin_th * cos_om + sin_fi * sin_om ;
16 arpnew(2,1) = cos_th * sin_om ;
17 arpnew(2,2) = sin_fi * sin_th * sin_om + cos_fi * cos_om ;
18 arpnew(2,3) = cos_fi * sin_th * sin_om - sin_fi * cos_om ;
19 arpnew(3,1) = (-1.0) * sin_th ;
20 arpnew(3,2) = sin_fi * cos_th ;
21 arpnew(3,3) = cos_fi * cos_th ;
22 % arpnew
23 vstatnew = arpnew*vinp;
24 end

```

Viri

Anon., 1999. TCM2 Electronic Compass Module, User's Manual, Rev. 1.08. Precision Navigation, Inc., Santa Rosa, California, pp. 1-41.

Anon., 2004. EZ-Compass-3 Application Manual, Soft. Ver. 4.x Advanced Orientation Systems, Inc., Linden, New Jersey, pp. 1-12.

Anon., 2008. MTi and MTx User Manual and Technical Documentation. Xsens Technologies B.V., Enschede, The Netherlands, pp. 1-58.

Anon., 2010. WindMaster & WIndMaster Pro Ultrasonic Anemometer, User Manual. Gill Instruments, Ltd., Lymington, UK, pp. 1-48.

Anon., 2016. MTi User Manual Xsens Technologies B.V., Enschede, The Netherlands, pp. 1-81.

Goldstein, H., 1980. Classical Mechanics, 2nd Ed. Addison-Wesley, Reading.

Goldstein, H., Poole, C.P., Safko, J.L., 2001. Classical Mechanics, 3rd Ed. Pearson Education Limited, Essex.

Grm, A., Malačič, V., 2002. Korekcija navidezne hitrosti vetra na oceanografski boji Nacionalni inštitut za biologijo, Morska biološka postaja, Piran, p. 11.

Šonc, D., 2016. Sistem za zajem oceanografskih podatkov na Morski biološki postaji v Piranu, Uporabniški priročnik Nacionalni inštitut za biologijo, Piran, pp. 1-63.

Vodopivec, M., 2010. Izračun povprečnih vrrednosti meritev vetra in vetrovnih sunkov na oceanografski boji Vida Nacionalni inštitut za biologijo, Piran, p. 18.

Vodopivec, M., 2015. Izračun povprečnih vrrednosti meritev vetra in vetrovnih sunkov na oceanografski boji Vida Nacionalni inštitut za biologijo, Piran, p. 17.