



INŽENÝRSKÁ MECHANIKA 2005

NÁRODNÍ KONFERENCE

s mezinárodní účastí

Svratka, Česká republika, 9. - 12. května 2005

SUGGESTION AND OPTIMALIZATION OF TILT SENSOR USE COMPLEMENTARY FILTERS

Milan Kopinec^{*}, Pavel Houška^{**}

Summary: *This paper deals with design and optimization of the sensory system for estimating of the tilt based on a mathematical model. The system consists of two microelektromechanical sensors, a rate gyro and an accelerometer. The data coming from the sensors are fused through a complementary filter.*

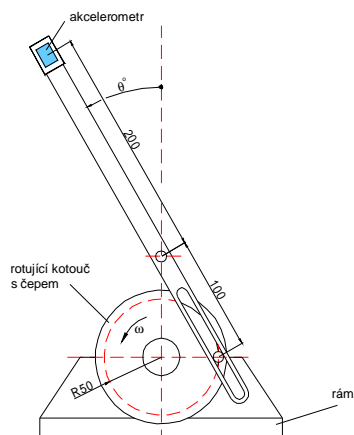
1. Úvod

V současné době se pro měření náklonu v robotických zařízeních používají především mikroelektromechanické akcelerometry a gyroskopy. Jejich cena s vývojem technologie MEMS klesá a proto se stávají velmi zajímavými v mnoha technických odvětvích. Automobilový průmysl požaduje levné gyroskopy a akcelerometry pro brzděné, tlumící a bezpečnostní prvky, videokamery a fotoaparáty potřebují snímače pro stabilizaci obrazu. Tyto požadavky jsou hlavním iniciátorem současného bouřlivého vývoje těchto snímačů.

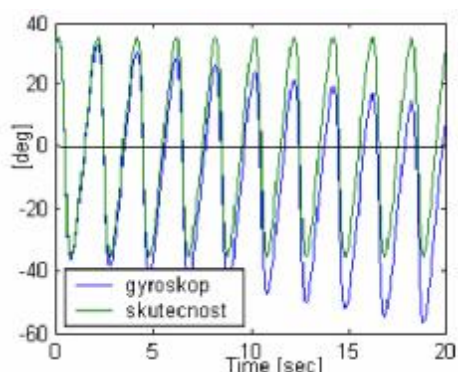
Obecně platí, že měření výchylky pomocí akcelerometru je přesné pouze za předpokladu, kdy na snímač nepůsobí dynamické účinky. V případě statického měření je měřeno pouze gravitační zrychlení, ze kterého lze pak určit úhel sklonu snímače vůči zemi. Dynamické účinky se s tímto sčítají a lze je chápat jako chybu. Naproti tomu gyroskopický snímač je vůči těmto účinkům téměř imunní. Výstupem snímače je úhlová rychlost, ze které přes integraci získáme úhel. Bohužel, gyroskopické snímače jsou zatíženy teplotním driftem, který se projevuje tak, že i v klidu snímač měří jistou nenulovou úhlovou rychlost. Obojí lze demonstrovat na modelu kyvadla podle obr. 1. Umístíme-li na jeho konec gyroskop a akcelerometr budou jejich výstupem měřené hodnoty, které jsou zobrazeny na obrázcích 2. a 3.

* Ing. Milan Kopinec: Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky, Vysoké učení technické v Brně, Technická 2, 616 69 Brno, tel: +420 541 142 804, e-mail: milan.kopinec@gmail.com.

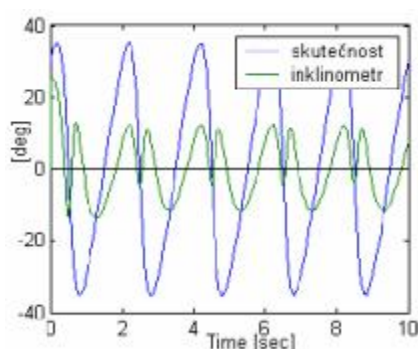
** Ing. Pavel Hoška, PhD.: Ústav automatizace a informatiky, Vysoké učení technické v Brně, Technická 2, 616 69 Brno, tel: +420 541 142 885, e-mail: houska.p@fme.vutbr.cz.



Obr. 1. Model kyvadla a rozmístění snímačů na kyvadle.



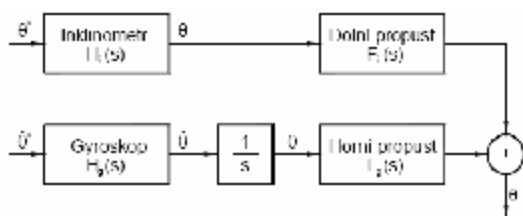
Obr. 2. Projev teplotního driftu gyroskopu při měření náklonu (matematický model).



Obr. 3. Náklon měřený akcelerometrem

2. Rozbor snímače

K získání informací o skutečném náklonu lze použít například metodu spočívající v zavedení Kalmanového filtru, která byla publikována pány M. Juny, S. I. Roumeliotisy, G. S. Sukhatme (2000), nebo pomocí exponenciálního pozorovatele publikovanou H. Rehbinder a X. Hu. Velmi jednoduchá metoda s kterou přišli A. J. Baerveld a R. Klang (1997) spočívá v aplikaci tzv. komplementární filtru, kde pro stanovení náklonu využívají vibračního gyroskopu a elektrolytického inklinometru. Na obr. 4. je schéma takového řešení.



Obr. 4. Schéma vyhodnocení náklonu pomocí komplementárního filtru.

Základní myšlenka spočívá v zavedení dvou filtrů, které odstraňují nevýhody obou snímačů, tj. nenulová úhlová rychlost za klidu u gyroskopu a citlivost na pohyb u akcelerometru.

Filtr dolní propust druhého řádu pro akcelerometr, funguje jako váhový prvek, který dává větší váhu velikosti náklonu při jeho pomalých změnách (dynamické účinky jsou

malé). U filtru horní propust je tomu naopak. Signál z něj má větší váhu při rychlých změnách v náklonu. Součet obou signálů by pak měl dát přibližný skutečný náклон. V [1] používají pro přenos inklinometru:

$$H_i(s) = \frac{1}{ts + 1},$$

kde t [s] je časová konstanta snímače, jako jednu část dolnoproústného filtru 2 řádu:

$$F_i^*(s) \cdot H_i(s) = \frac{2Ts + 1}{T^2s^2 + 2Ts + 1}.$$

Navazující filtr je proto dán přenosem:

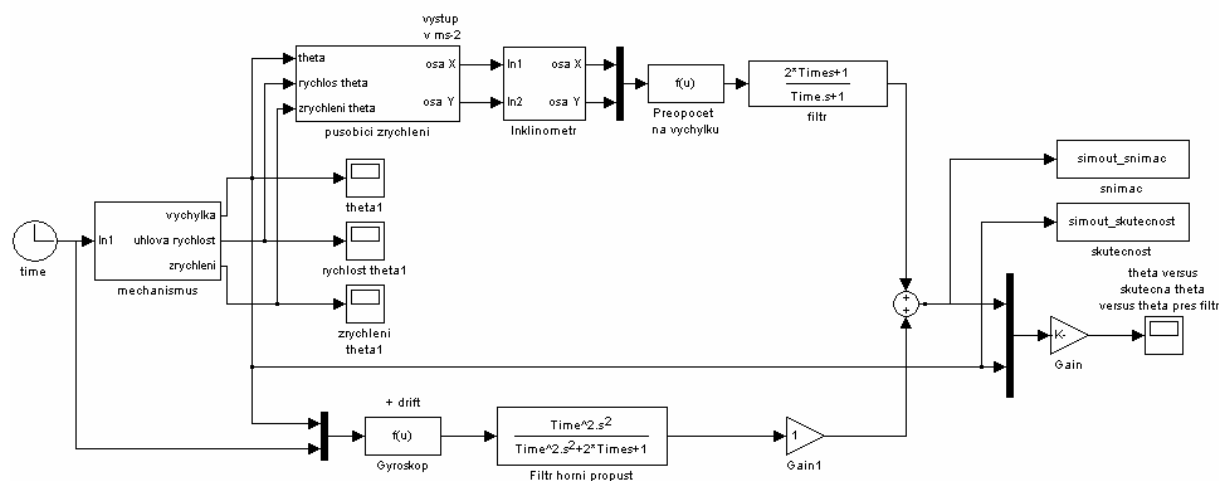
$$F_i^*(s) = \frac{2ts + 1}{ts + 1}.$$

Přenos gyroskopu zde uvažují jako ideální tj. $H_g(s) = 1$, neboť časová konstanta snímače je řádově vyšší než u inklinometru ($f_{-3dB} = 40 \text{ Hz}$). Z toho vychází přenos navazujícího filtru:

$$F_g(s) = \frac{T^2s^2}{T^2s^2 + 2Ts + 1}.$$

Jedinými parametry kterými lze řídit chování snímače jsou pouze časové konstanty filtrů a snímačů. Z [1] vyplývá že nejlepší výsledky dává snímač pro časovou konstantu filtrů rovnou časové konstantě inklinometru, tj. $T = t$. Je však nutné podotknout, že řešení pomocí elektrolytického inklinometru velmi omezuje možnost optimálního nastavení celkového snímače náklonu. To je způsobeno tím, že tento snímač má pevnou časovou konstantu a není ji tedy možné nastavovat. Jiný případ, ale platí pro akcelerometry typu MEMS, kde lze ve většině případů časovou konstantu měnit (např. ADXL202 firmy Analog Devices).

Pro představu a popsání vlastností snímače náklonu podle tohoto řešení byl vytvořen jeho matematický model a model kyvadla na kterém je snímač umístěn. Model byl vytvořen v prostředí Matlab – Simulink, obr. 5.

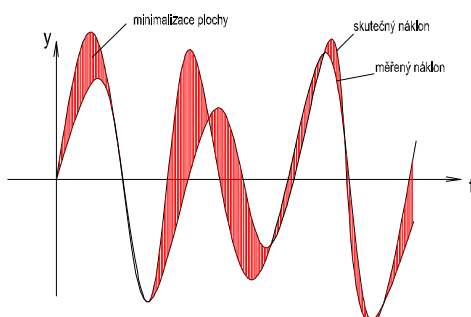


Obr. 5. Model snímače v prostředí Simulink

Jak již bylo řečeno, jediným parametrem kterým lze snímač kontrolovat je časová konstanta gyroskopu, akcelerometru a obou filtrů, která je pro všechny stejná. Úkolem je nalézt optimální hodnotu při které snímač vykazuje nejlepší parametry, tj. přesnost s jakou měří. Z tohoto důvodu byla provedena optimalizace, která spočívá v hledání minimálního rozdílu mezi skutečným náklonem a náklonem měřeným v závislosti na časové konstantě (na obrázku 5. označena jako proměnná Time). Chyba snímače je určena vyšrafovanou oblastí, obr. 6.

Účelová funkce je dána vztahem: $\min_{B_w} \left\{ \int abs |y_{skut} - y^*(t, T_o)| \cdot dt \mid t \in R_+, T_o \in R_+ \right\}$

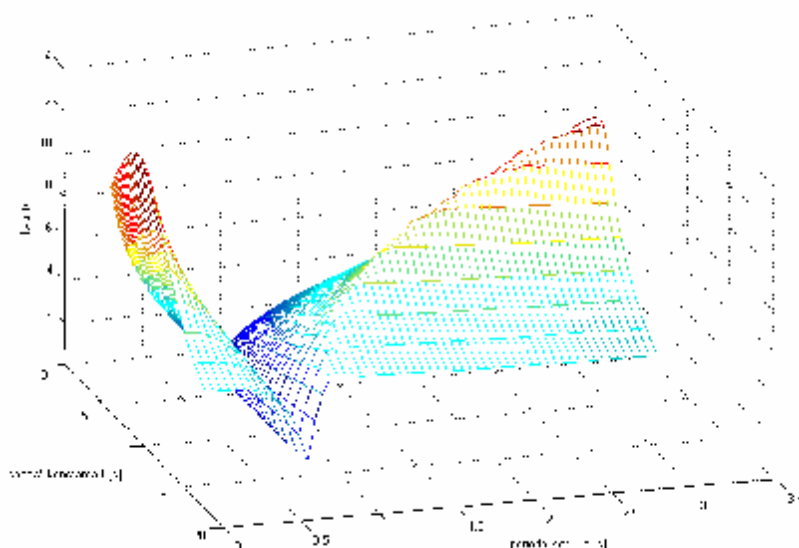
kde: y_{skut} [rad] .. je skutečný náklon t [s] .. časová konstanta
 $y^*(t, T_o)$ [rad] .. je náklon měřený T_o [s] .. je perioda kmitu kyvadla



Obr. 6. Vyhodnocování chyby mezi měřenou výchylkou a výchylkou skutečnou

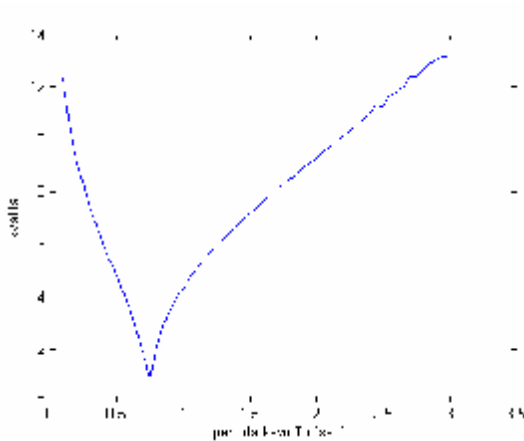
Výsledky simulace jsou zakresleny v 3D grafu (obr. 7.), kde je pro různou periodu kyvu a různou šířku pásma vynesena kvalita snímače. Kvalita je dána vztahem:

$$kvalita = \frac{\text{Perioda}}{\sqrt{\int abs |y_{skut} - y^*(t, T_o)| \cdot dt}} = \sqrt{\frac{\text{Perioda}}{\text{chyba}}}$$

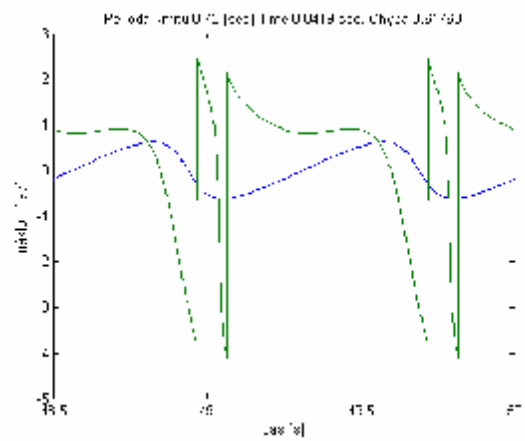


Obr. 7. Vyhodnocení kvality snímače

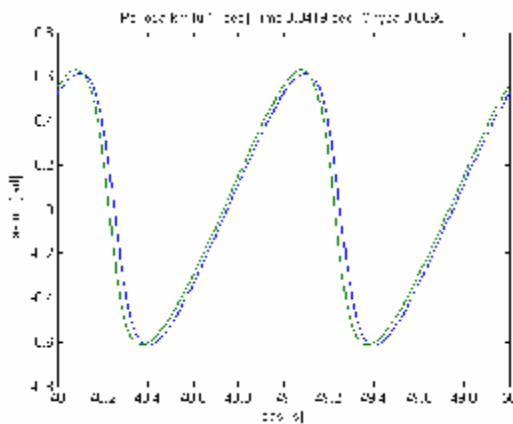
Na základě optimalizace vyšlo, že průměrné nejlepší výsledky dává snímač pro časovou konstantu $t = 8,8[s]$. Konkrétní křivka je zobrazena na obr. 8. Lze vypořodovat, že v okolí periody $T_o = 0,75 [sec]$ se snímač chová nejhůře. Na obr. 9 je zakreslen průběh náklonu skutečného a měřeného pro tuto periody. Na obr. 10. a 11. pro periody $T_o = 1 [s]$ resp. $T_o = 3 [s]$



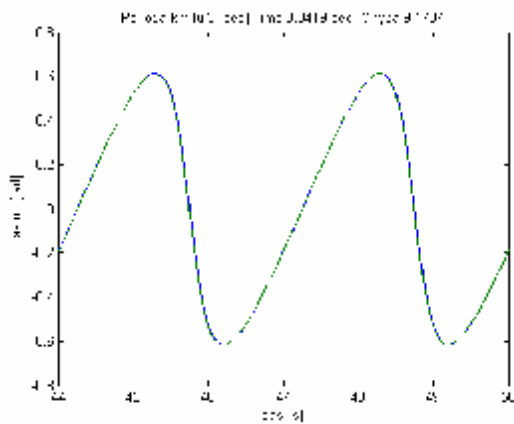
Obr. 8. Kvalita snímače v závislosti na periodě kyvu. $t = 8.8 [s]$.



Obr. 9. Skutečný náklon (modrá křivka) vs. náklon měřený (zelená křivka) pro periody kyvu $T_o = 0,75$ a $t = 8.8 [s]$.



Obr. 10. Skutečný náklon (modrá křivka) vs. náklon měřený (zelená křivka) pro periody kyvu $T_o = 1[s]$ a $t = 8.8 [s]$



Obr. 11. Skutečný náklon (modrá křivka) vs. náklon měřený (zelená křivka) pro periody kyvu $T_o = 3[s]$ a $t = 8.8 [s]$.

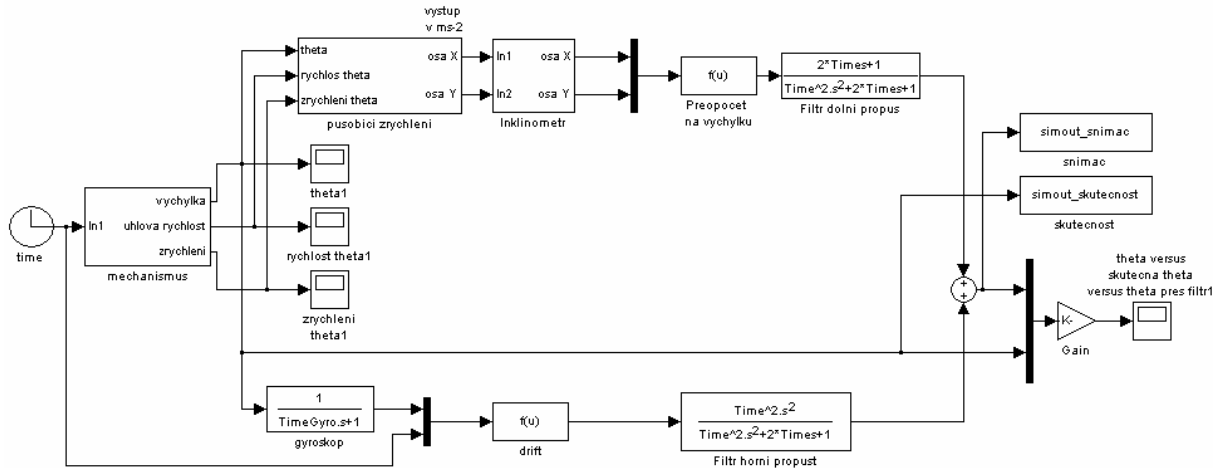
Na základě těchto výsledků došlo k rozboru modelu a hledání jeho zlepšení. Model byl upraven do podoby, která je zobrazena na obr. 12. Časová konstanta akcelerometru byla snížena na co nejmenší a při tom únosnou hodnotu, neboť čím je tato časová konstanta menší tím je přesnost akcelerometru horší. Šířka pásma akcelerometru byla nastavena na $75 Hz$. Filtr horní propust druhého řádu již není tvořen součinem přenosu akcelerometru a navazujícího filtru, ale filtrem jediným. Do modelu byl zahrnut i přenos gyroskopu, jehož šířka pásma je $40 Hz$ (odpovídá modelu Analog Devices ADXRS300):

$$H_g(s) = \frac{1}{ts + 1}.$$

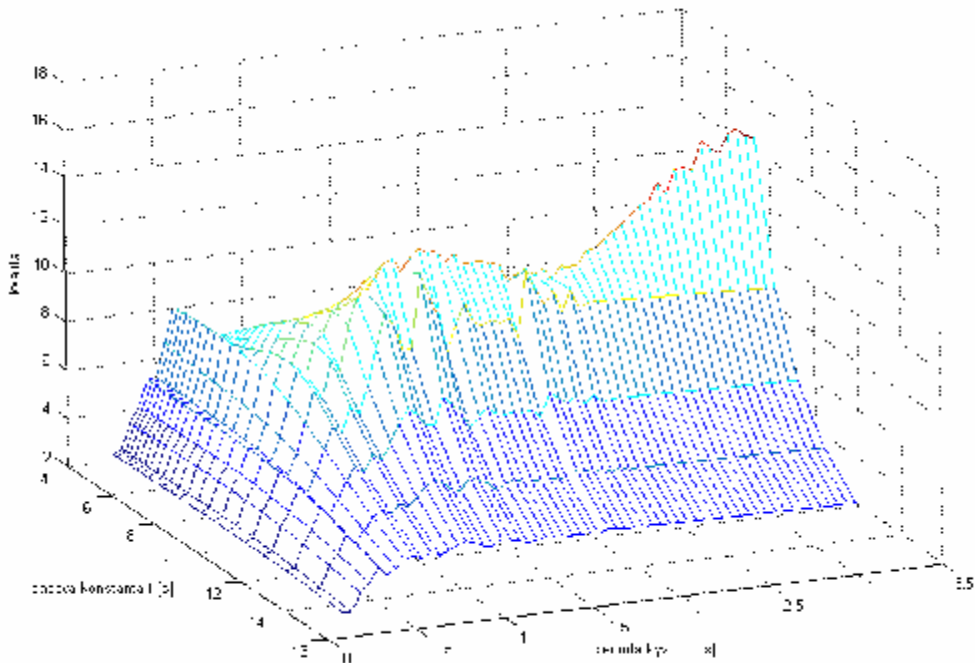
V této konfiguraci byla kvalita snímače dána pouze nastavením šířky pásma obou filtrů. Pro vztah mezi časovou konstantou a šířkou pásma platí:

$$t = \frac{1}{2p \cdot BandWidth} [s].$$

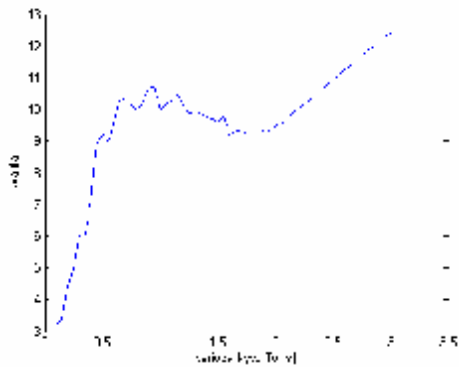
Výsledky simulace jsou na obrázcích 13 až 15.



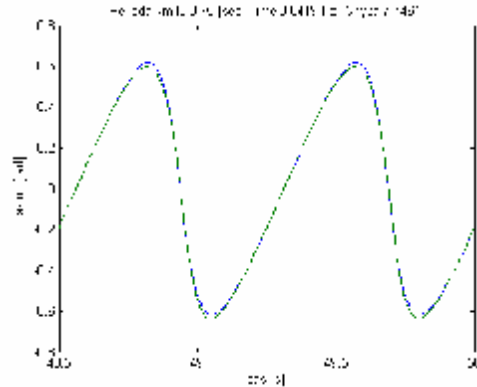
Obr. 12. Upravený model snímače náklonu



Obr. 13. Vyhodnocení kvality snímače



Obr. 14. Kvalita snímače v závislosti na periodě kyvu. $t = 8.8$ [s].



Obr. 15. Skutečný náklon (modrá křivka) vs. náklon měřený (zelená křivka) pro periodu kyvu $T_o = 0,75$ a $t = 8.8$ [s]

Z porovnání výsledků předchozího modelu snímače a snímače upraveného lze říci, že došlo k celkovému zlepšení jeho chování. Menší přesnost s kterou měří za podmínek rychlého kývání ($< 0,5$ [s]), je způsobena vlastní šířkou pásma gyroskopu, která u předešlého modelu nebyla uvažována. V praxi však lze například u zmiňovaného gyroskopu ADXRS300 pomocí dodatečných el. obvodů tuto velikost ještě několikanásobně zvýšit.

3. Poděkování

Práce byla provedena za podpory projektu MSM 262100024 „Výzkum a vývoj mechatronických soustav“.

4. Závěr

Cílem tohoto článku bylo ukázat jedno z možných řešení pro vytvoření snímače náklonu na základě moderních mikroelektromechanický snímačů. Model vytvořený v programu Simulink ukázal, že řešení kde je dolnoprostupný filtr druhého řádu tvořen samotným akcelerometrem a popsáním navazujícím členem není zcela dobrý. Jako výhodnější se jeví použití samotného filtru. Optimalizace, která spočívala v nalezení nejvhodnější časové konstanty ukázala, že je tato konstanta poměrně vysoká. Musí se však počítat s tím, že byla získána na základě matematickém popisu snímačů a skutečná hodnota se může ve skutečnosti lišit.

5. Literatura

Rehbinder, H., & Hu, X. (2000b). Nonlinear state estimation for rigid body motion with low-pass sensors. *Systems and Control Letters*, 40(3), 183–190.

Juny M., Roumeliotis S. I., Sukhatmez G. S. State Estimation of an Autonomous Helicopter Using Kalman Filtering. University of Southern California Los Angeles.

A.-J. Baerveldt and R. Klang (1997). A low-cost and low-weight attitude estimation system for an autonomous helicopter. *1997 IEEE International Conference on Intelligent Engineering Systems*, pp. 391 – 395.