

Odbor:		Dátum merania:		
Trieda:		Dátum odovzdania:		
Skupina:		Vyučujúci: doc.RNDr.Juraj Pančík, CSc.		
Laboratórium:		Klasifikácia:	Známka:	Podpis:
Meno a priezvisko žiaka:				

LABORATÓRNE CVIČENIE č. 35 Meranie vlastností inerciálnej meracej jednotky (9 axis IMU)

OBSAH:

1. Názov cvičenia a jednotlivých úloh.
2. Súpis prístrojov a pomôcok pri meraní.
3. Popis meracej metódy a schéma merania.
4. Tabuľky a grafy nameraných a vypočítaných hodnôt.
5. Vyhodnotenie merania.

1. NÁZOV CVIČENIA:

Meranie vlastností inerciálnej meracej jednotky (9 axis IMU)

- Úlohy
- a) Oboznámte sa s hardvérovým a softvérovým riešením meracieho prípravku – 9 osová inerciálna meracia jednotka (IMU) so snímačom typu MEMS BNO 055. Vysvetlite zmerané a vypočítané veličiny poskytované týmto snímačom.
 - b) Vykonajte merania vlastností pohybu a dynamickej zmeny polohy objektu. Pre meranie použite koncový bod jednoduchého kyvadla ako zdroj pohybu.
 - c) Na základe vlastných meraní určite hodnotu doby kyvu pri pohybe koncového bodu kyvadla.
 - d) Zobraďte získané časové rady vybraných veličín vhodným zobrazovacím sw nástrojom (napríklad on line nástroj CHART STUDIO od fy. PLOTLY
 - e)

2.SÚPIS POUŽITÝCH PRÍSTROJOV

	Prístroj – pomôcka	Typové označenie a rozsah	Výrobca	Inventárne číslo
1.	MP c.35 Merací prípravok so snímačom typu MEMS BNO 055			
2.	Mechanická zostava jednoduchého kyvadla			
3.	SW: Putty, Notepad++, EXCEL			

Nedostatky pri hodnotení (zapiše vedúci merania učiteľ):

3. Popis meracej metódy a schéma merania

Jednoduché kyvadlo – teória

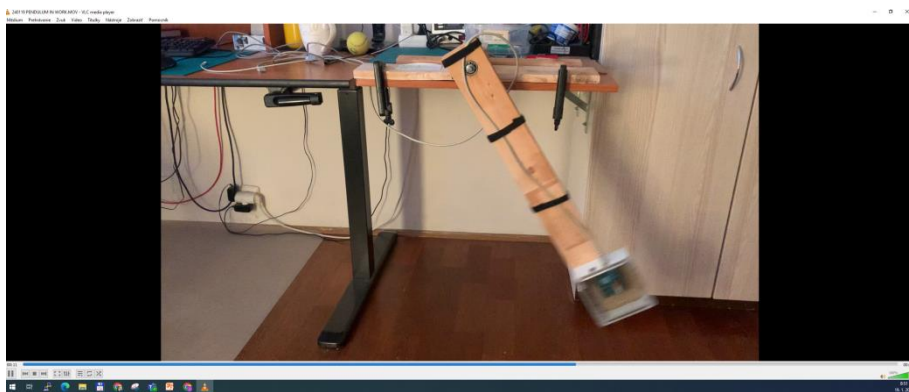
Jednoduché kyvadlo má na rozdiel od dvojitého (či zloženého) iba jedno rameno. Vzťahy medzi fyzikálnymi veličinami dobre popisuje zdroj napr. (Blevins, 2016) a Obrázok 1. Vlastná frekvencia kyvadla nezávisí od hmotnosti kyvadla a je nepriamo úmerná druhej odmocnine z dĺžky ramena podľa rovnice nižšie (platí pre maximálny uhol výchylky menší ako 1 rad cca 57°). Hodinové kyvadlo s periódou 2 s je 0,99 m dlhé a jeho spúšťač mechanizmus tiká raz za sekundu v krajných polohách kyvu kyvadla.

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{L}} \quad \text{Hz}$$

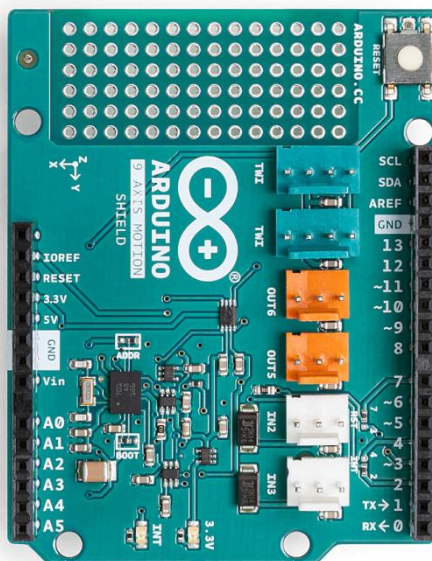
Obrázok 1 Zjednodušený model jednoduchého kyvadla ZDROJ: (Blevins, 2016)

Jednoduché kyvadlo – konštrukcia

Fotografia použitého jednoduchého kyvadla (v pohybe) je uvedená na Obrázok 2 a v pokoji Obrázok 3



Obrázok 2 Snímok z videa pohybujúceho sa jednoduchého kyvadla so 9 axis IMU snímačom na jeho konci (ZDROJ: vlastné spracovanie)



Obrázok 3 Voľno visiace kyvadlo s detailami jeho konštrukcie. (ZDROJ: vlastné spracovanie)

Obrázok 4 ARDUINO rozširujúca doska 9axis IMU so snímačom BNO 055. ZDROJ: (ARDUINO Ltd., 2020)

Princíp merania parametrov pohybu koncového bodu jednoduchého kyvadla

Merací prípravok bol pripojený na koniec ramena jednoduchého kyvadla Obrázok 3 s dĺžkou ramena $L = 560$ mm. Rameno kyvadla je vyrobené z plotovej smrekovej dosky so šírkou $= 82$ mm a hrúbkou $= 18$ mm.

Srdcom meracieho prípravku je 9 osová inerciálna meracia jednotka (IMU) so snímačom typu MEMS BNO 055 osadenom v rámci ARDUINO UNO shield-u (ARDUINO Ltd., 2020). Snímače parametrov pohybu MEMS (Bharath University, 2023), (Keim, 2018), (Analog Devices, 2015) sú veľmi významné pre technické odbory. Funkcie senzora BNO055 sú nasledovné : trojrozmerné zrýchlenie, rýchlosť odklonu (gyroskop v 3 osiach), údaje o intenzite magnetického poľa v 3 na seba kolmých osiach. Snímač poskytuje aj vypočítané signály fúzie sensorov, ako sú kvaternióny, eulerove uhly, vektor rotácie, lineárne zrýchlenie a vektor gravitácie. Inteligentný senzor BNO055 (BOSCH Sensortec. , 2023) je riešenie SiP (System in Package), ktoré integruje trojosový 14-bitový akcelerometer, presný trojosový 16-bitový gyroskop s uzavretou slučkou, trojosový geomagnetický senzor a 32-bitový mikrokontrolér so softvérom BSX3.0 FusionLib. Tento inteligentný senzor je výrazne menší ako porovnateľné riešenia. Integráciou sensorov a fúzie sensorov v jednom zariadení BNO055 uľahčuje integráciu, vyhýba sa zložitým multidodávateľským riešeniam, a tým zjednodušuje inovácie, napr. nové aplikácie, ako je hardvér internetu vecí. Snímač BNO055 je ideálnou voľbou pre rozšírenú realitu, hry, osobné zdravie a fitness, navigáciu v interiéri a všetky ostatné aplikácie, ktoré vyžadujú kontextové povedomie. Ideálne sa hodí pre náročné aplikácie, ako je rozšírená realita, navigácia, hry, robotika alebo priemyselné aplikácie. Spoločnosti BOSCH Sensortec Ltd. a ARDUINO Ltd. poskytujú zadarmo sw knižnicu IMU ARDUINO LIBRARY : `Arduino_NineAxesMotion`. Táto sw knižnica umožnila integráciu nášho snímača do meraní.

Data acquisition – zber údajov

Bol napísaný program pre platformu ARDUINO UNO založený na spomenutej sw knižnici ARDUINO LIBRARY Arduino_NineAxesMotion. Program inicializuje snímač BNO 055 a cyklicky vyčítava všetky zmerané a snímačom vypočítané „fusion“ údaje tieto posielajú na sériovú linku. Terminálový program v počítači (PUTTY.EXE) umožňuje záznam (tzv. "log") údajov vysielaných ARDUINOM do textového súboru (napríklad) putty_LOG.txt. Záznam tlmených kyvov jednoduchého kyvadla trvá 2 minúty, frekvencia čítania dát je 50 Hz ($120 \text{ s} \times 50 = \text{cca } 6000 \text{ riadkov}$). Zaznamenaný súbor putty_LOG.txt sa upravil – pomocou textového editora (Notepad++) sa desatinné body zamenili za čiarky (je to kvôli kompatibilitate s EXCEL - om pri importe dát). Následne sa súbor putty_LOG.txt importoval do EXCEL-u a excelovský súbor sa uložil (ako napr.) 230118 PENDULUM_1.xlsx. Zaznamenané dáta v čase (tzv. TIME SERIES) sa „vizualizovali“ a spracovávali v online nástroji CHART STUDIO PLOTLY (PLOTLY, 2024), ktorého výrobca je spoločnosť PLOTLY.

```
=~=~=~=~=~=~=~=~=~= PuTTY log 2024.01.20 09:50:51 =~=::~::~::~::~\nIY: -0.53 IZ: -0.02 gX: 0.50 gY: -9.78 gZ: e: 0.10 aZ: -0.78 IX: -0.26 IY: 0.02 IZ: 0.00 gX: 9.77 gY:10909 qX: 2405 qY: -11794 qZ: 2133\nTime: 310627 aX: 9.50 aY: 0.10 aZ: -0.78 IX: -0.26 IY: 0.02 IZ: 0.00 gX: 9.77 gY:r\t\nDefault accelerometer configuration settings...Range: 1 Bandwidth: 3 Power Mode: 0 Streaming in ...3...2...1...\nTime: 3990 aX: 9.48 aY: 0.11 aZ: -0.81 IX: -0.29 IY: -0.01 IZ: -0.08 gX: 9.77 gY: 0.13 gZ: -0.72 eH: 0.00 eR: 85.69 eP: -179.19 qW: 11149 qX: 161 qY: -12004 qZ: -3\nTime: 4017 aX: 9.49 aY: 0.10 aZ: -0.78 IX: -0.28 IY: -0.02 IZ: -0.05 gX: 9.77 gY: 0.13 gZ: -0.72 eH: 0.00 eR: 85.69 eP: -179.19 qW: 11149 qX: 161 qY: -12004 qZ: -3
```

Obrázok 5 Úvodná sekvencia textového záznamu ukazujúca počiatočné nastavenia snímача BNO 055. ZDROJ: vlastné spracovanie

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	AA	AB	AC	AD	AE	AF	AG	AH
1	Time:	4017	aX:	9,49	aY:	0,1	aZ:	-0,78	IX:	-0,28	IY:	-0,02	IZ:	-0,05	gX:	9,77	gY:	0,13	gZ:	-0,72	eH:	0	eR:	85,69	eP:	-179,19	qW:	11149	qX:	161	qY:	-12004	qZ:	-3
2	Time:	4043	aX:	9,49	aY:	0,1	aZ:	-0,72	IX:	-0,28	IY:	0	OZ:	0,02	gX:	9,77	gY:	0,13	gZ:	-0,72	eH:	0	eR:	85,69	eP:	-179,19	qW:	11149	qX:	161	qY:	-12004	qZ:	-3
3	Time:	4071	aX:	9,49	aY:	0,11	aZ:	-0,68	IX:	-0,28	IY:	-0,01	IZ:	0,03	gX:	9,77	gY:	0,13	gZ:	-0,72	eH:	0	eR:	85,69	eP:	-179,19	qW:	11149	qX:	161	qY:	-12004	qZ:	-3
4	Time:	4097	aX:	9,56	aY:	0,11	aZ:	-0,79	IX:	-0,21	IY:	-0,02	IZ:	-0,07	gX:	9,77	gY:	0,13	gZ:	-0,72	eH:	0	eR:	85,69	eP:	-179,19	qW:	11149	qX:	161	qY:	-12004	qZ:	-3
5	Time:	4123	aX:	9,61	aY:	0,1	aZ:	-0,8	IX:	-0,16	IY:	-0,02	IZ:	-0,08	gX:	9,77	gY:	0,13	gZ:	-0,72	eH:	0	eR:	85,69	eP:	-179,19	qW:	11149	qX:	161	qY:	-12004	qZ:	-3
6	Time:	4149	aX:	9,54	aY:	0,1	aZ:	-0,78	IX:	-0,23	IY:	-0,02	IZ:	-0,05	gX:	9,77	gY:	0,13	gZ:	-0,72	eH:	0	eR:	85,69	eP:	-179,19	qW:	11149	qX:	161	qY:	-12004	qZ:	-3
7	Time:	4175	aX:	9,43	aY:	0,11	aZ:	-0,76	IX:	-0,34	IY:	-0,01	IZ:	-0,03	gX:	9,77	gY:	0,13	gZ:	-0,72	eH:	0	eR:	85,69	eP:	-179,19	qW:	11149	qX:	161	qY:	-12004	qZ:	-3
8	Time:	4201	aX:	9,45	aY:	0,12	aZ:	-0,83	IX:	-0,32	IY:	0	OZ:	-0,1	eX:	9,77	gY:	0,13	gZ:	-0,72	eH:	0	eR:	85,69	eP:	-179,19	qW:	11149	qX:	161	qY:	-12004	qZ:	-3

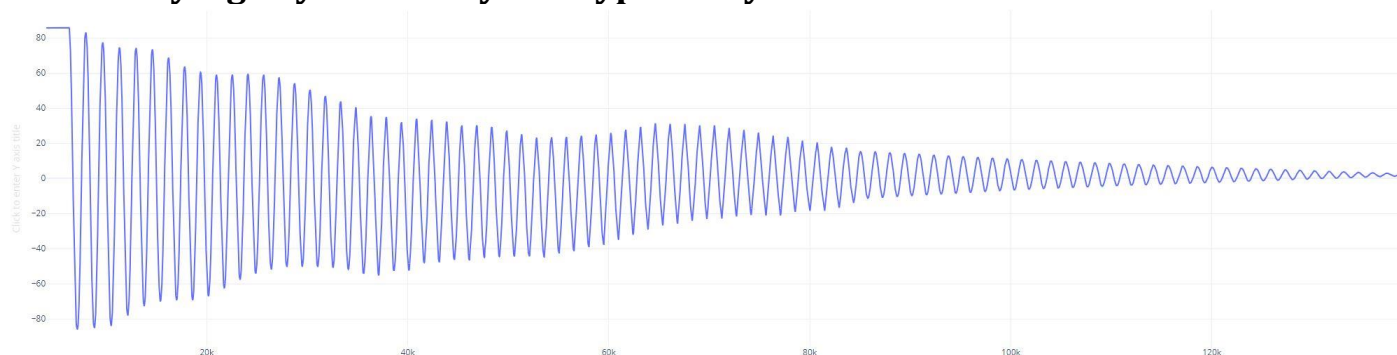
Obrázok 6 Časová séria údajov zo snímača BN0055 importovaná zo súboru TXT určená pre ďalšie spracovanie.
ZDROJ: vlastné spracovanie

Data processing – vyhodnotenie údajov

Údaje sme vyhodnocovali pre zmeranie doby kyvu kyvadla pre zmeranú dĺžku ramena $L=560$ mm. Z časovej série pre Eulerov uhol eR (ROLL) (viď. Obrázok 7) sme po zväčšení (viď. Obrázok 8) sme vybrali časy prechodu hodnoty eR cez nulu a zaznamenali sme výsledky do

Tabuľka 1.

4. Tabuľky a grafy nameraných a vypočítaných hodnôt.



Obrázok 7 Záznam časovej série eulerovho uhlu eR (ROLL). ZDROJ: vlastné spracovanie



Obrázok 8 Detail záznamu časovej série eulerovho uhlu eR (ROLL). ZDROJ: vlastné spracovanie

n.	Časová značka (ms)	Doba trvania polperiody (ms)	Zmeraná frekvencia kyvu kyvadla (Hz)	Vypočítaná frekvencia kyvadla pre $L = 0,560$ m	Rozdiel medzi zmeranou a vypočítanou frekvenciou kyvu (s)
0	6697				
	7553	856	0,58	0,6664704	0,08
1	8380	827	0,60	0,6664704	0,06
	9262	882	0,57	0,6664704	0,10
2	10065	803	0,62	0,6664704	0,04
	10920	855	0,58	0,6664704	0,08
3	11724	804	0,62	0,6664704	0,04
	12552	828	0,60	0,6664704	0,06
4	13383	831	0,60	0,6664704	0,06
	14188	805	0,62	0,6664704	0,05
5	15014	826	0,61	0,6664704	0,06
	15796	782	0,64	0,6664704	0,03
6	16601	805	0,62	0,6664704	0,05
	17428	827	0,60	0,6664704	0,06

7	18182	754	0,66	0,6664704	0,00
	19013	831	0,60	0,6664704	0,06
8	19789	776	0,64	0,6664704	0,02
	20594	805	0,62	0,6664704	0,05
9	21348	754	0,66	0,6664704	0,00
	22153	805	0,62	0,6664704	0,05
10	22933	780	0,64	0,6664704	0,03
	23711	778	0,64	0,6664704	0,02
	15331,18	810,19	0,62	0,67	0,05

Tabuľka 1 Zmerané časy prechodu uhla eR (ROLL) cez nulu, vypočítané a zmerané doby kyvu kyvadla. ZDROJ: vlastné spracovanie

5. Vyhodnotenie merania

Merania doby kyvu jednoduchého kyvadla na základe záznamu jedného z eulerových uhlov (ROLL) poukázali na výbornú zhodu s vypočítanou (0,05s t.j. 7%). Hodnota L reprezentuje vzdialenosť teoretického bodu ťažiska kyvadla od bodu otáčania a preto je L predmetom odhadu. Doba kyvu pri tlmených kmitoch kyvadla sa nemení a naše je dôkazom fyzikálnej teórie. Záznam tlmených kyvov jednoduchého kyvadla trvá 2 minúty, frekvencia čítania dát je 50 Hz (120 s x 50 = cca 6000 riadkov) čo už predstavuje príklad tzv. BIG DATA. Technika zobrazenia a analýzy dlhých časových radov pomocou dedikovaných nástrojov je moderná metóda. Pre pochopenie meraných a vypočítavaných veličín snímačom BNO055 je táto metóda veľmi účinná.

6. Informačné zdroje

Analog Devices. 2015. Accelerometer and Gyroscopes Sensors: Operation, Sensing, and Applications. [Online] 17. 3 2015. [Dátum: 25. 2 2024.] <https://www.analog.com/en/technical-articles/accelerometer-and-gyroscopes-sensors-operation-sensing-and-applications.html>.

ARDUINO Ltd. 2020. ARDUINO 9 Axis Motion Shield. [Online] 2020. [Dátum: 25. 2 2024.] <https://docs.arduino.cc/hardware/9-axis-motion-shield>.

Bharath University. 2023. Introduction to MEMS (Microelectromechanical Systems). [Online] 2023. [Dátum: 25. 02 2024.] https://www.bharathuniv.ac.in/page_images/pdf/courseware_eee/Notes/NE3/BEE026%20MEMS.pdf.

Blevins, Robert D. 2016. *Formulas for dynamics, acoustics and vibration*. s.l. : Willey, 2016. s. 119-120. ISBN 978-1-119-03811-5.

BOSCH Sensortec. . 2023. Smart sensor: BNO055 Integrated MCU + flash. Integrated sensor fusion. [Online] 2023. [Dátum: 25. 2 2024.] <https://www.bosch-sensortec.com/products/smart-sensor-systems/bno055/>.

Keim, Robert. 2018. Introduction to MEMS (Microelectromechanical Systems). [Online] 4. 12 2018. [Dátum: 25. 2 2024.] <https://www.allaboutcircuits.com/technical-articles/introduction-to-mems-microelectromechanical-systems/>.

PLOTLY. 2024. CHART STUDIO PLOTLY. [Online] <https://en.wikipedia.org/wiki/Plotly>, 2024. [Dátum: 25. 02 2024.] <https://chart-studio.plotly.com/create/#/>.