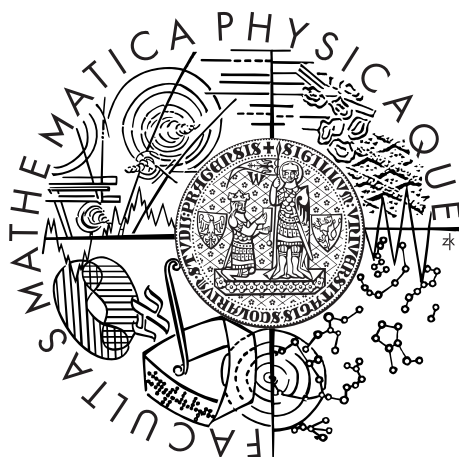


Charles University in Prague
Faculty of Mathematics and Physics

MASTER THESIS



Tomáš Krejčí

Title of the thesis

Name of the department or institute

Supervisor of the master thesis: First and last name

Study programme: programme

Specialization: specialization

Prague 2016

Dedication.

I declare that I carried out this master thesis independently, and only with the cited sources, literature and other professional sources.

I understand that my work relates to the rights and obligations under the Act No. 121/2000 Coll., the Copyright Act, as amended, in particular the fact that the Charles University in Prague has the right to conclude a license agreement on the use of this work as a school work pursuant to Section 60 paragraph 1 of the Copyright Act.

In date

signature of the author

Název práce: Název práce

Autor: Tomáš Krejčí

Katedra: Název katedry či ústavu, kde byla práce oficiálně zadána

Vedoucí diplomové práce: Jméno a příjmení s tituly, pracoviště

Abstrakt:

Klíčová slova:

Title:

Author: Tomáš Krejčí

Department: Název katedry či ústavu, kde byla práce oficiálně zadána

Supervisor: Jméno a příjmení s tituly, pracoviště

Abstract:

Keywords:

Contents

Introduction	3
0.1 Cíl práce	3
0.2 Co očekávám, že bude moje přidaná hodnota	3
1 Preliminaries	4
2 Related works	5
3 My approach	6
3.1 iPhone specification	6
3.2 Architecture	6
3.3 Quaternions	7
3.3.1 Quaternions and rotation in \mathbb{R}^3	8
4 Experimental results	9
5 Notes	10
5.1 Postup	10
5.2 Harmonogram	11
5.3 29. 2. 2016	11
5.4 7. 3. 2016	11
Conclusion	12
List of Tables	14
List of Abbreviations	15
Attachments	16

Todo list

Where this number comes from	6
How to cite this correctly	8
Why rotation matrix in 3-space can be described by orthogonal matrix with determinant $+1$	8

Introduction

1 to 3 pages

describe problem, structure at the end

0.1 Cíl práce

Na konci by měl být program, který je schopný dělat lokalizaci pomocí IMU a videa z kamery s kompenzací rolling shutter. Navíc by SW měl být schopen kompenzovat naakumulovanou chybu tím, že si bude tvořit interní mapu a v ní pomocí loop closure opravovat chyby.

Další požadavky:

- Bude to balíček do ROSu (i když vývoj bude pravděpodobně probíhat jinak)
- Otevřená licence
- Musíme být schopni snadno ověřit výsledky (nějak snadno porovnatelné s ground truth)
- Celá lokalizace by měla být energeticky nenáročná
- Kalibrace by neměla vyžadovat žádné speciální znalosti (například časy uzávěrky apod.)

0.2 Co očekávám, že bude moje přidaná hodnota

Největší "akademická přidaná hodnota" by mělo být přidání globální mapy a loop closure k metodě založené na IMU. To pokud ví, nikdo nemá.

Další velká přidaná hodnota bude v otevřenosti samotného řešení. Opět, asi v současné době nejsou naimplementované žádné open-source řešení, která by fungovala takto sofistikovaně i s kamerou atp.

Integrace různých senzorů, stačí popsat jak se to udělá na nějaké hrubší úrovni.

1. Preliminaries

2. Related works

with structure!!!

more precise definitions

http://wiki.ros.org/robot_pose_ekf - Jednoduchá lokalizace pomocí EKF

http://wiki.ros.org/robot_localization - Možnosti pomocí UKF nebo EKF. Umí zakomponovat i GPS a VO, ale není nijak zvlášť sofistikované.

Li, M., Kim, B.H., Mourikis, A.: Real-time motion tracking on a cellphone using inertial sensing and a rolling-shutter camera. In: IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), pp. 4712–4719, May 2013

Tohle je ten hlavní článek o lokalizaci pomocí IMU a kamery s rolling shutter

High-accuracy differential tracking of low-cost GPS receivers

[1] [Web](#) [Youtube](#)

They implemented relative GPS position tracking which I can use as ground truth. They estimated accuracy of the system to be much better than I need. If I can make it work I can use it without any other justification (maybe?). Only think I need to make it work is two GPS receivers. It looks like they don't have to be same model or even manufacturer.

Method is implemented in Java. Only think I have to do is implement three interfaces. One for input GPS stream, one for byte array transfer over the network and one for data output. It seems to be reasonable easy to implement in matter of days (or maybe hours).

Real-time motion tracking on a cellphone using inertial sensing and a rolling-shutter camera

[2] [Web](#)

This is the main article. I have to study this one more deeply.

Probabilistic robotics

[3]

This is very good book recommended by Barták and Obdržálek. They have nice derivation of Kalman Filter. I'll probably use this as primary source of teoretical part.

Camera-Based Localization and Stabilization of a Flying Drone

[4]

This paper was recommended to me by Barták. It promisses to do VO based camera localization using keypoints.

It also looks like there is nice derivation of EKF and it's usege for localization.

Short-Term Motion Tracking Using Inexpensive Sensors

[5]

There is really nice derivation for INS without rotation. It's very simple to understand. INS derivation uses some kind of rotation matrix which is very complicated. Maybe I can look at derivation of INS using quaternions for rotation. It might be simpler.

Start Developing iOS Apps (Swift)

[Web](#)

This is very nice tutorial about programming iOS apps with Swift. I'll use it as starting point.

3. My approach

Definition of my problem.

I'll try to describe my problem step by step. Starting with simplest navigation up to final result.

Maybe there'll be one chapter/section with description of final solution.

3.1 iPhone specification

It appears that iPhone 6s has MPU-6500 IMU [6]. It should have precision of 250 (units?). Best gyro I was able to find was 200 from Sparkfun [7].

iPhone provides me only with accelerometer data in units G. This is bad for my application. I found on Wiki gravitation field in Frankfurt to be 9.81412 measured 25. 1. 2016.

There is possibility to at least estimate size of G-force by formula from wiki - Gravity of Earth.

Another way is to query Wolfram Alpha "gravitation acceleration, Prague". The result is 9.81373. Based on EGM2008 12th order model, 223 meters above sea level

Where
this
num-
ber
comes
from

3.2 Architecture

I'll use my iPhone for computing all navigation tasks. It's good for

- I already have it
- I don't have to resolve issues connected with hardware
- IMU is correctly mounted on rigid body with camera (I've read a paper that says this was major source of error for them. Sadly I can't remember what the paper was. I only remember they shoot rocket and measured properties of IMU).
- It is standard device. So everybody can easily imagine what is required to run this software
- I have it everywhere with me

But there are also problems with this decision

- I can't controll precisely my HW
- I'm limited to Apple's API
- I don't know if apple do any preprocessing of data. According to [8] it should be raw data.

For visualization I'll send all results over the network to ROS and then visualize them here. Main advantages are

- I don't have to study iOS development deeply.
- Almost everything is ready for visualization in ROS.
- ROS application might be quite simple
- I can send GPS data too and then compute ground truth on ROS-device
- I'm not limited to small display of iPhone
- I can spend a lot of computing power on visualization
- Network communication is relatively easy

Disadvantages

- I have to have another device for visualization

3.3 Quaternions

I'll probably use quaternions for INS. So it'd be great to have one place to keep review of quaternions at.

Quaternion Q is

$$Q = (1q_1, iq_2, jq_3, kq_4)$$

with following rules

$$i^2 = -1 \quad j^2 = -1 \quad k^2 = -1 \quad (3.1)$$

$$\begin{aligned} ij &= k & ji &= -k \\ jk &= i & kj &= -i \\ ki &= j & ik &= -j \end{aligned} \quad (3.2)$$

Quaternion addition is defined as

$$P + Q = (p_1 + q_1) + (p_2 + q_2)i + (p_3 + q_3)j + (p_4 + q_4)k$$

Observation 1. Quaternion addition is associative

$$P + Q = Q + P$$

Observation 2. Quaternion addition is commutative

$$(P + Q) + R = P + (Q + R)$$

Definition 3.3.1 (Quaternion multiplication).

$$\begin{aligned} PQ &= (p_1 + ip_2 + jp_3 + kp_4)(q_1 + iq_2 + jq_3 + kq_4) \\ &= p_1q_1 - p_2q_2 - p_3q_3 - p_4q_4 \\ &\quad + i(p_1q_2 + p_2q_1 + p_3q_4 - p_4q_3) \\ &\quad + j(p_1q_3 + p_2q_4 + p_3q_1 - p_4q_2) \\ &\quad + k(p_1q_4 + p_2q_3 + p_3q_2 - p_4q_1) \end{aligned}$$

Definition of quaternion multiplication is similar to polynomial multiplication wrt. properties 3.1 and 3.2.

Maybe better memorizable if following table

	q_1	q_2	q_3	q_4
p_1	1	i	j	k
p_2	i	-1	k	$-j$
p_3	j	$-k$	-1	i
p_4	k	j	$-i$	-1

Which says that coefficient of term of PQ with $p_i q_j$ can be found in table at row p_i and column q_j .

Definition 3.3.2 (Quaternion conjugates).

$$\overline{Q} = \overline{(q_1 + iq_2 + jq_3 + kq_4)} \equiv (q_1 - iq_2 - jq_3 - kq_4)$$

Observation 3. $(Q\overline{Q}) \in \mathbb{R}$

Observation 4. $(Q + \overline{Q}) \in \mathbb{R}$

Observation 5. $\overline{P + Q} = \overline{P} + \overline{Q}$

Observation 6. $\overline{PQ} = \overline{Q} \cdot \overline{P}$

Definition 3.3.3 (Quaternion norm).

$$|Q| = \sqrt{q_1^2 + q_2^2 + q_3^2 + q_4^2}$$

Observation 7. $Q\overline{Q} = \overline{Q}Q = |Q|^2$

3.3.1 Quaternions and rotation in \mathbb{R}^3

Theorem 3.3.1. *Rotation matrix theorem* Rotation matrices are precisely those orthogonal matrices A with $\det A = +1$.

Proof can be found in [Mark Reeder's course Math 210 Linear Algebra, lesson 17](#).

Theorem 3.3.2. *Euler's theorem* If R is 3×3 matrix satisfying $R^T R = R R^T = I$ and $\det R = +1$, then there is a non-zero vector v satisfying $Rv = v$.

Proof of this theorem can be found in [9].

This theorem tells us that we can describe every rotation in \mathbb{R}^3 as vector v and angle θ .

As a consequence of Euler's theorem we can say that any composition of rotations in \mathbb{R}^3 can be described in this way. This fact isn't immediately obvious.

How to cite this correctly

Why rotation matrix in 3-space can be de

4. Experimental results

5. Notes

5.1 Postup

Tady nastíním postup takový, aby byl co možná nejkratší, inkrementální a jednotlivé kroky šly snadno ověřit a měly nějaký význam sami o sobě.

1. Jeste v první fazi posbírat co nejvíce clanku, nakouknout a precist. Vytvorit si nejaký teoreticky zaklad.
2. Celý vývoj budu dělat nejprve na svém iPhonu, protože má vše potřebné, dostatečnou baterku a mám ho vždy u sebe. Mělo by mi to tedy pomoci usnadnit vývoj. Nese to s sebou drobnou komplikaci toho, že řešení musí být potom snadn portovatelné do ROSu. Navíc musím psát vše v C++ a pouze správně abstrahovat části, které interagují s okolním světem tak, abych je mohl snadno portovat pro ROS nebo jinou platformu. [21 days]
3. Nejdříve bych měl být schopný interpretovat data z IMU a správně odečítat z kamery. To je komplikované zejména proto, že na iPhone se vyvíjí ve swiftu.
4. Další krok bude postavit kompletní INS pouze pomocí gyroskopu a akcelerometru. Tento krok bude jaksi "bokem", protože výsledné řešení bude používat EKF a bude fungovat trochu jinak. Myslím ale, že bude snadnější, když takto získám představu o tom, jak INS vlastně funguje. Potom mi to usnadní další vývoj.
5. (Volitelně: Nejdřív naimplementovat metodu z článku na který se odvolávají. Možná to bude snazší.)
6. Potom bude cíl bude reimplementovat samotné EKF z článku doporučeného Filipem. Asi největší problém se zdá být samotné pochopení metody, protože se jedná o ne úplně obvyklou variantu EKF.
7. Dále je krok validace této metody jako takové a srovnání s výsledky uvedenými v originálním článku. Pro tohle bude největší problém mít rozmyšlenou správnou metodu měření chyby. V principu mě napadají dvě varianty. Jedna pomocí dvou GPS (High-Accuracy Differential Tracking of Low-Cost GPS Receivers, W Hedgcock, M Maroti, J Sallai, P Volgyesi, A Ledeczki) a potom pomocí loop closure, kde se ale dozvím jen celkovou naakumulovanou chybu.
8. Potom vzít výsledky z předchozího kroku a přidat k nim tvorbu globální mapy tak, jak ji dělá ORB SLAM (ORB-SLAM: A Versatile and Accurate Monocular SLAM System).
9. Nakonec porovnání s předchozí variantou o kolik se mi podařilo zpřesnit navigaci.

5.2 Harmonogram

- **začátek května** Mít definované přesné zadání práce.
- **do 28. 7. 2016** Odevzdání bakalářských a diplomových prací pro podzimní termín státních závěrečných zkoušek Přihlášení se k podzimnímu termínu bakalářských a magisterských státních závěrečných zkoušek Uzavření studia závěrečných ročníků bakalářského a magisterského studia – kontrola splnění všech podmínek pro připuštění k podzimnímu termínu SZZ

5.3 29. 2. 2016

- *Ask Filip Matzner about his Master's thesis*
He'll do neuroevolution.
- *Ask Filip for his sources*
Filip sent me his sources. I'll have a look at it. Thanks Filip! :)
- *Look at web of paper publisher if there are any additional files*
It looks like there are no additional files at [web](#).
- *Contact Tomas Prochazka (tms.prochazka@gmail.com) about his visualization in thesis*
I contacted him. I meet him and talked about visualization and his work in general. He uses Java only. For visualization he use JFreeChart library. It looks like quite powerful library for static plots. However for animation and 3D it doesn't seems to be best choice. I'll probably not use any of this.
- *Bakalářka Jan Škoda, bude mít odkaz na článek ze kterého se vycházelo, možná má nějaký článek. Stabilizace drona na základě VO feature based.*
I've downloaded the paper. I've added section below with comments about the paper.

5.4 7. 3. 2016

- *How to deal with HW. Is there any kind of support? Does anybody have two same GPS receivers?*
Ask Obdrzalek about HW. He may borrow me somethink.
- *Can I ask library to buy book [10]?*
Bartak will think about this. Maybe he will buy it from grant or ask library.
- *How to properly cite web pages.*
I don't have to strictly follor ISO 960. I'll use the best option for citations I can find.

Conclusion

Bibliography

- [1] Will Hedgecock, Miklos Maroti, Janos Sallai, Peter Volgyesi, and Akos Ledecz. High-accuracy differential tracking of low-cost gps receivers. In *Proceeding of the 11th annual international conference on Mobile systems, applications, and services*, pages 221–234. ACM, 2013.
- [2] Mingyang Li, Byung Hyung Kim, and Anastasios I Mourikis. Real-time motion tracking on a cellphone using inertial sensing and a rolling-shutter camera. In *Robotics and Automation (ICRA), 2013 IEEE International Conference on*, pages 4712–4719. IEEE, 2013.
- [3] Sebastian Thrun, Wolfram Burgard, and Dieter Fox. *Probabilistic robotics*. MIT press, 2005.
- [4] Jan Skoda and Roman Barták. Camera-based localization and stabilization of a flying drone. In *The Twenty-Eighth International Flairs Conference*, 2015.
- [5] Filip Matzner and Roman Barták. Short-term motion tracking using inexpensive sensors. In *Advances in Artificial Intelligence and Its Applications*, pages 583–601. Springer, 2015.
- [6] St.J. Dixon-Warren. Comparing the invensense and bosch accelerometers found in the iphone 6, September 2014.
- [7] Accelerometer, gyro and imu buying guide.
- [8]
- [9] Bob Palais and Richard Palais. Euler’s fixed point theorem: The axis of a rotation. *Journal of Fixed Point Theory and Applications*, 2(2):215–220, 2007.
- [10] David Titterton and John L Weston. *Strapdown inertial navigation technology*, volume 17. IET, 2004.

List of Tables

List of Abbreviations

Attachments