

Master-Thesis

Path Planning for Dynamic Maneuvers with Micro Aerial Vehicles

Autumn Term 2014

Declaration of Originality

I hereby declare that the written work I have submitted entitled

Path Planning for Dynamic Maneuvers with Micro Aerial Vehicles

is original work which I alone have authored and which is written in my own words.¹

Author(s)

First name

Last name

Supervising lecturer

First name

Last name

With the signature I declare that I have been informed regarding normal academic citation rules and that I have read and understood the information on 'Citation etiquette' (http://www.ethz.ch/students/exams/plagiarism_s_en.pdf). The citation conventions usual to the discipline in question here have been respected.

The above written work may be tested electronically for plagiarism.

Place and date

Signature

¹Co-authored work: The signatures of all authors are required. Each signature attests to the originality of the entire piece of written work in its final form.

Contents

Abstract	iii
Symbols	iv
1 Introduction	1
1.1 State of the Art	1
2 Einige wichtige Hinweise zum Arbeiten mit \LaTeX	3
2.1 Gliederungen	3
2.2 Referenzen und Verweise	3
2.3 Aufzählungen	3
2.4 Erstellen einer Tabelle	4
2.5 Einbinden einer EPS-Graphik	5
2.6 Mathematische Formeln	5
2.7 Weitere nützliche Befehle	6
A Irgendwas	7
B Nochmals irgendwas	9
Bibliography	11

Abstract

The goal of this Master-Thesis is to develop a numerical robust trajectory-planning algorithm for aggressive multi-copter flights in dense environments. The trajectory generated by this algorithm is represented by polynomials which are jointly optimized. The cost function of the optimization consists of the total trajectory-time as well as the total quadratic snap (second derivation of the acceleration). Including the snap into the cost function guaranties a trajectory without abrupt or expensive control inputs.

Furthermore the process of exploring the state space using the Rapidly-Exploring Random Tree (RRT) algorithm is embedded into the numerical robust algorithm. The sampling points of the RRT (or RRT*) algorithm are then used as the vertices in the polynomial optimization.

Symbols

Symbols

ϕ, θ, ψ roll, pitch and yaw angle

Indices

x x axis

y y axis

Acronyms and Abbreviations

ETH Eidgenössische Technische Hochschule

UAV Unmanned Aerial Vehicle

RRT Rapidly-Exploring Random Tree

Chapter 1

Introduction

1.1 State of the Art

A lot of research has been done in the field of Unmanned Aerial Vehicles (UAV) in the last years leading to a strong improvement in planning [1] as well as in control [[2], [3]]. Another research field is machine learning [4] which is suitable to enhance the performance of aerobatic maneuvers but seems to have a downside regarding motion planning and trajectory generation in dense environments.

Speaking of trajectory planning, there are two different strategies which are pursued. On the one hand, the geometric and the temporal planning are decoupled [5] on the other hand, geometric and temporal information are coupled and the trajectory is the result of a minimization problem. For the coupled problem one can make use of the differential flatness of a quadrocopter to derive constraint on the trajectory. Then formulate a cost-function which could be the trajectory-time [3] or the total snap [6] (second derivation of acceleration).

Another aspect of planning is exploring the state space in the first place. A strong tool to do so are incremental search techniques as for instance the A* [7] or the RRT* algorithm [8]. The sampling points of the solution of the incremental search can then be used as the vertices for the polynomial optimization.

Chapter 2

Einige wichtige Hinweise zum Arbeiten mit L^AT_EX

Nachfolgend wird die Codierung einiger oft verwendeten Elemente kurz beschrieben. Das Einbinden von Bildern ist in L^AT_EX nicht ganz unproblematisch und hängt auch stark vom verwendeten Compiler ab. Typisches Format für Bilder in L^AT_EX ist EPS¹.

2.1 Gliederungen

Ein Text kann mit den Befehlen `\chapter{.}`, `\section{.}`, `\subsection{.}` und `\subsubsection{.}` gegliedert werden.

2.2 Referenzen und Verweise

Literaturreferenzen werden mit dem Befehl `\cite{.}` erzeugt. Ein Beispiel: [?]. Zur Erzeugung von Fussnoten wird der Befehl `\footnote{.}` verwendet. Auch hier ein Beispiel². Querverweise im Text werden mit `\label{.}` verankert und mit `\ref{.}` erzeugt. Beispiel einer Referenz auf das zweite Kapitel: Kapitel 2.

2.3 Aufzählungen

Folgendes Beispiel einer Aufzählung ohne Numerierung,

- Punkt 1
- Punkt 2

wurde erzeugt mit:

```
\begin{itemize}
  \item Punkt 1
  \item Punkt 2
\end{itemize}
```

Folgendes Beispiel einer Aufzählung mit Numerierung,

¹Encapsulated Postscript

²Bla bla.

1. Punkt 1

2. Punkt 2

wurde erzeugt mit:

```
\begin{enumerate}
  \item Punkt 1
  \item Punkt 2
\end{enumerate}
```

Folgendes Beispiel einer Auflistung,

P1 Punkt 1

P2 Punkt 2

wurde erzeugt mit:

```
\begin{description}
  \item[P1] Punkt 1
  \item[P2] Punkt 2
\end{description}
```

2.4 Erstellen einer Tabelle

Ein Beispiel einer Tabelle:

Table 2.1: Daten der Fahrzyklen ECE, EUDC, NEFZ.

Kennzahl	Einheit	ECE	EUDC	NEFZ
Dauer	s	780	400	1180
Distanz	km	4.052	6.955	11.007
Durchschnittsgeschwindigkeit	km/h	18.7	62.6	33.6
Leerlaufanteil	%	36	10	27

Die Tabelle wurde erzeugt mit:

```
\begin{table}[h]
\begin{center}
\caption{Daten der Fahrzyklen ECE, EUDC, NEFZ.}\vspace{1ex}
\label{tab:tabnefz}
\begin{tabular}{ll|ccc}
\hline
Kennzahl & Einheit & ECE & EUDC & NEFZ \\
\hline
Dauer & s & 780 & 400 & 1180 \\
Distanz & km & 4.052 & 6.955 & 11.007 \\
Durchschnittsgeschwindigkeit & km/h & 18.7 & 62.6 & 33.6 \\
Leerlaufanteil & \% & 36 & 10 & 27 \\
\hline
\end{tabular}
\end{center}
\end{table}
```

2.5 Einbinden einer EPS-Graphik

Das Einbinden von Graphiken kann wie folgt bewerkstelligt werden:

```
\begin{figure}[h]
  \centering
  \includegraphics[width=0.75\textwidth]{pics/k_surf.eps}
  \caption{Ein Bild.}
  \label{pics:k_surf}
\end{figure}
```

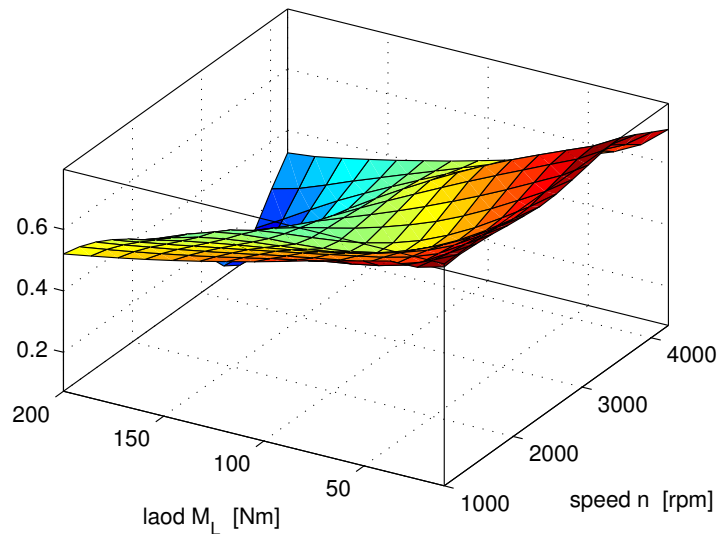


Figure 2.1: Ein Bild.

oder bei zwei Bildern nebeneinander mit:

```
\begin{figure}[h]
  \begin{minipage}[t]{0.48\textwidth}
    \includegraphics[width = \textwidth]{pics/cycle_we.eps}
  \end{minipage}
  \hfill
  \begin{minipage}[t]{0.48\textwidth}
    \includegraphics[width = \textwidth]{pics/cycle_ml.eps}
  \end{minipage}
  \caption{Zwei Bilder nebeneinander.}
  \label{pics:cycle}
\end{figure}
```

Bemerkung: Ersetzt man den Positionierungsparameter `h` durch `H`, so wird das Gleiten der Abbildung verhindert.

2.6 Mathematische Formeln

Einfache mathematische Formeln werden mit der `equation`-Umgebung erzeugt:

$$p_{meof}(T_e, \omega_e) = k_1(T_e) \cdot (k_2 + k_3 S^2 \omega_e^2) \cdot \Pi_{max} \cdot \sqrt{\frac{k_4}{B}}. \quad (2.1)$$

Der Code dazu lautet:

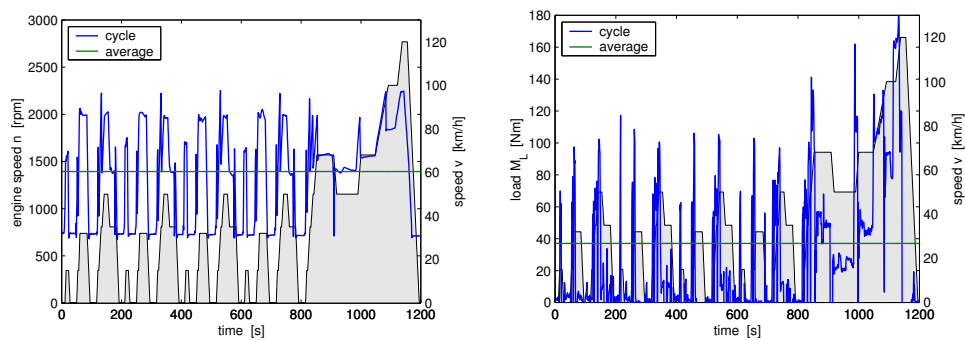


Figure 2.2: Zwei Bilder nebeneinander.

```

\begin{equation}
p_{\text{me0f}}(T_e, \omega_e) \setminus = \setminus k_1(T_e) \setminus \cdot (k_2 + k_3 S^2
\omega_e^2) \setminus \cdot \Pi_{\text{max}} \setminus \cdot \sqrt{\frac{k_4}{B}} \setminus , .
\end{equation}

```

Mathematische Ausdrücke im Text werden mit `$formel$` erzeugt (zB: $a^2 + b^2 = c^2$).

2.7 Weitere nützliche Befehle

Hervorhebungen im Text sehen so aus: *hervorgehoben*. Erzeugt werden sie mit dem `\emph{.}` Befehl.

Appendix A

Irgendwas

Bla bla ...

Appendix B

Nochmals irgendwas

Bla bla ...

Bibliography

- [1] R. HE, A. BACHRACH, M. ACHTELIK, A. GERAMIFARD, D. GURDAN, S. PRENTICE, J. STUMPF, AND N. ROY: *On the design and use of a micro air vehicle to track and avoid adversaries*. The Int. Journal of Robotics Research, vol. 29, pp. 529-546, 2010.
- [2] D. COLLING, O. A. YAKIMENKO, J. F. WHIDBORNE, AND A. K. COOKE: *A prototype of an autonomous controller for a quadrotor UAV*. In Proceedings of the European Control Conference, Kos, Greece, 2007, pp. 1-8.
- [3] M. HEHN AND R. D'ANDREA : *Quadrocopter trajectory generation and control*. In International Federation of Automatic Control (IFAC), World Congress 2011, 2011.
- [4] S. LUPASHIN, A. SCHOLLIG, M. SHERBACK, AND R. D'ANDREA: *A simple learning strategy for high-speed quadrocopter multi-flips*. In Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, Anchorage, AK, May 2010, pp. 1642-1648.
- [5] Y. BOUKTIR, M. HADDAD, AND T. CHETTIBI: *Trajectory Planning for a Quadrotor Helicopter*. In Mediterranean Conference on Control and Automation, Jun. 2008, pp. 1258-1263
- [6] D. MELLINGER AND V. KUMAR: *Minimum snap trajectory generation and control for quadrotors*. In International Conference on Robotics and Automation, 2011, pp. 2520-2525.
- [7] M. LIKHACHEV, G. GORDON AND S. THRUN: *ARA*: Anytime A* with Provable Bounds on Sub-Optimality* . Advances in Neural Information Processing Systems, vol. 16, 2003
- [8] C. RICHTER, A. BRY, AND N. ROY: *Polynomial Trajectory Planning for Quadrotor Flight*. In International Conference on Robotics and Automation, 2013.