

Tese apresentada à Pró-Reitoria de Pós-Graduação do Instituto Tecnológico de Aeronáutica, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Ciências no Programa de Pós-Graduação em Aerospace Engineering, Área de (Area).

Pedro Kuntz Puglia

ORBITAL MANEUVER OPTIMIZATION

Tese aprovada em sua versão final pelos abaixo assinados:

Prof. Dr. Willer Gomes dos Santos
Orientador

Prof. Emilien Flayac
Coorientador

Prof. Dr. John von Neumann
Pró-Reitor de Pós-Graduação

Campo Montenegro
São José dos Campos, SP - Brasil
2022

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)
Divisão de Informação e Documentação

Puglia, Pedro Kuntz
Orbital Maneuver Optimization / Pedro Kuntz Puglia.
São José dos Campos, 2022.
18f.

Tese de Doutorado – Curso de Aerospace Engineering. Área de (Area) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, 2022. Orientador: Prof. Dr. Willer Gomes dos Santos. Coorientador: Prof. Emilien Flayac.

1. Optimization. 2. Control. 3. Orbital mechanics. I. Instituto Tecnológico de Aeronáutica. II. Orbital Maneuver Optimization.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

PUGLIA, Pedro Kuntz. **Orbital Maneuver Optimization**. 2022. 18f. Tese de Doutorado – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Pedro Kuntz Puglia

TÍTULO DO TRABALHO: Orbital Maneuver Optimization.

TIPO DO TRABALHO/ANO: Tese / 2022

É concedida ao Instituto Tecnológico de Aeronáutica permissão para reproduzir cópias desta tese e para emprestar ou vender cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta tese pode ser reproduzida sem a autorização do autor.

Pedro Kuntz Puglia
Rua H8X, Ap. XXX
12.228-46? – São José dos Campos–SP

ORBITAL MANEUVER OPTIMIZATION

Pedro Kuntz Puglia

Composição da Banca Examinadora:

Prof. Dr.	Alan Turing	Presidente	-	ITA
Prof. Dr.	Willer Gomes dos Santos	Orientador	-	ITA
Prof.	Emilien Flayac	Coorientador	-	ISAE-SUPAERO
Prof. Dr.	Linus Torwald		-	UXXX
Prof. Dr.	Richard Stallman		-	UYYY
Prof. Dr.	Donald Duck		-	DYSNEY
Prof. Dr.	Mickey Mouse		-	DISNEY

ITA

Aos amigos da Graduação e Pós-Graduação do ITA por motivarem tanto a criação deste template pelo Fábio Fagundes Silveira quanto por motivarem a mim e outras pessoas a atualizarem e aprimorarem este excelente trabalho.

Agradecimentos

Primeiramente, gostaria de agradecer ao Dr. Donald E. Knuth, por ter desenvolvido o T_EX.

Ao Dr. Leslie Lamport, por ter criado o L^AT_EX, facilitando muito a utilização do T_EX, e assim, eu não ter que usar o Word.

Ao Prof. Dr. Meu Orientador, pela orientação e confiança depositada na realização deste trabalho.

Ao Dr. Nelson D'Ávila, por emprestar seu nome a essa importante via de trânsito na cidade de São José dos Campos.

Ah, já estava esquecendo... agradeço também, mais uma vez ao T_EX, por ele não possuir vírus de macro :-)

*"If I have seen farther than others,
it is because I stood on the shoulders of giants."*

— SIR ISAAC NEWTON

Resumo

Aqui começa o resumo do referido trabalho. Não tenho a menor idéia do que colocar aqui. Sendo assim, vou inventar. Lá vai: Este trabalho apresenta uma metodologia de controle de posição das juntas passivas de um manipulador subatuado de uma maneira subótima. O termo subatuado se refere ao fato de que nem todas as juntas ou graus de liberdade do sistema são equipados com atuadores, o que ocorre na prática devido a falhas ou como resultado de projeto. As juntas passivas de manipuladores desse tipo são indiretamente controladas pelo movimento das juntas ativas usando as características de acoplamento da dinâmica de manipuladores. A utilização de redundância de atuação das juntas ativas permite a minimização de alguns critérios, como consumo de energia, por exemplo. Apesar da estrutura cinemática de manipuladores subatuados ser idêntica a do totalmente atuado, em geral suas características dinâmicas diferem devido a presença de juntas passivas. Assim, apresentamos a modelagem dinâmica de um manipulador subatuado e o conceito de índice de acoplamento. Este índice é utilizado na sequência de controle ótimo do manipulador. A hipótese de que o número de juntas ativas seja maior que o número de passivas ($n_a > n_p$) permite o controle ótimo das juntas passivas, uma vez que na etapa de controle destas há mais entradas (torques nos atuadores das juntas ativas), que elementos a controlar (posição das juntas passivas).

Abstract

Well, the book is on the table. This work presents a control methodology for the position of the passive joints of an underactuated manipulator in a suboptimal way. The term underactuated refers to the fact that not all the joints or degrees of freedom of the system are equipped with actuators, which occurs in practice due to failures or as design result. The passive joints of manipulators like this are indirectly controlled by the motion of the active joints using the dynamic coupling characteristics. The utilization of actuation redundancy of the active joints allows the minimization of some criteria, like energy consumption, for example. Although the kinematic structure of an underactuated manipulator is identical to that of a similar fully actuated one, in general their dynamic characteristics are different due to the presence of passive joints. Thus, we present the dynamic modelling of an underactuated manipulator and the concept of coupling index. This index is used in the sequence of the optimal control of the manipulator.

Lista de Figuras

FIGURA A.1 –Uma figura que está no apêndice 17

Lista de Tabelas

TABELA 1.1 – List of orbital maneuvers of interest.	13
TABELA 1.2 – Propulsion models and objective functions	14

Sumário

1	PLANNING	12
1.1	Method of Validation	12
1.2	Maneuvers of Interest	12
1.3	Minimum Viable Thesis (MVT)	12
1.3.1	Comments	14
1.4	Finite Thrust Dynamical Transfer	14
	APÊNDICE A – TÓPICOS DE DILEMA LINEAR	17
A.1	Uma Primeira Seção para o Apêndice	17
	ANEXO A – EXEMPLO DE UM PRIMEIRO ANEXO	18
A.1	Uma Seção do Primeiro Anexo	18

1 Planning

1.1 Method of Validation

All generated maneuvers are to be tested in Orekit with J2, atmospheric drag, sun and moon influence.

Is it worth it to add Orekit to the project? SatelliteToolbox provides atmospheric & sun & moon models + non spherical gravity models.

1.2 Maneuvers of Interest

Some orbital maneuvers are chosen as representative of general space mission needs for comparing models and solvers. Maneuvers are presented in table 1.1.

Each maneuver in this set needs to be combined with a propagation model, a propulsion model, and a solver. Options for each are discussed in the following sections.

1.3 Minimum Viable Thesis (MVT)

Impulsive solutions have coasting segments separated by instant impulses. Given a coasting model for the free evolution of orbital parameters Θ :

$$\Theta(t) = f(\Theta_0, t_0, t) \quad (1.1)$$

Solve a parameter optimization problem for a list of N impulses parameterized by:

$$p_{\text{impulse},i} = \begin{bmatrix} t_{\text{impulse},i} \\ \Delta \vec{V}_i \end{bmatrix}, \quad (1.2)$$

which configures a sequence of continuous piecewise trajectories described by (1.1),

Taking a spacecraft from an initial given condition to a final condition in **finite time**

Name/ application	Initial condition	Final condition	Comment
LEO maintenance	Circular orbit at $h \approx 400km$	Circular orbit at $h \approx 600km$	Coplanar, (equatorial: reproduce Hohmann?, inclined: reproduce (Da Silva Fernandes; Sessin, 1989))
SSO injection	Elliptic 200/800/98°	Circular 750km, 98°	Coplanar or small Ω/i correction?
Constellation ideshare injection	Circular 800km equatorial	Circular 600km, $i = 30^\circ$	Target point should move according to J2 model?
LEO to GEO transfer	Circular 600km	Circular 35000km	Explore optimal transfer with multiple impulses, add small plane change correction?
Escape velocity (with?) Moon	Circular 600km, equatorial	Target velocity vector $V(t \rightarrow \infty) = \vec{V}_e$	Variant: start in elliptical orbit (verify perigee is more efficient). Goal: use Moon for gravity assist

TABELA 1.1 – List of orbital maneuvers of interest.

	Constant Specific Impulse	Variable Specific Impulse
Description	Thrust limited, usually chemical engine	Power limited, usually electric engine
Objective Function corresponding to (1.3)	$\min \int_{t_0}^{t_f} \Gamma(t) dt$	$\min \int_{t_0}^{t_f} \Gamma^2(t) dt$

TABELA 1.2 – Propulsion models and objective functions

while maximizing final mass

$$\max_{T(t)} m_f \quad (1.3)$$

which, for constant specific impulse engines, is equivalent to minimize the total acceleration or the sum of ΔV 's:

$$\min \int_{t_0}^{t_f} \Gamma(t) dt = \min \sum_{i=1}^N \Delta \vec{V}_i \quad (1.4)$$

Then, verify optimality of the solution by applying primer vector theory as in (SPACECRAFT... , 2010) chapter 2 and find optimal number of impulses.

1.3.1 Comments

- Model (1.1) is supplied by Julia's Satellite Toolbox, for example J2 analytical orbit propagator
- Which objective function, (1.3) or (1.4) is more advantageous?
-

1.4 Finite Thrust Dynamical Transfer

The system is described by a dynamical equation

$$\dot{\Theta} = f(\Theta, u, t) \quad (1.5)$$

where the thrust input is constrained $0 \leq \|u\| \leq T_{\max}$. Solve for a control history $u(t)$ taking the system from a given initial position to a given final position in finite time while maximizing final mass as in (1.3). This objective has 2 versions depending on engine model shown in table 1.2 (SPACECRAFT... , 2010).

Many dynamical models of the form (1.5) exist, taking into account different physical phenomena and different parameterizations. This, combined with the multiple solver options, makes for a very repetitive combinatorial problem.

TODO

- decide validation model (capderou)
- decide model x solver x problem

Referências

DA SILVA FERNANDES, S.; SESSIN, W. Optimal low-thrust limited power transfer between neighbouring quasi-circular orbits of small inclinations around an oblate planet. **Acta Astronautica**, v. 19, n. 5, p. 401–409, 1989. ISSN 0094-5765. DOI: [https://doi.org/10.1016/0094-5765\(89\)90106-9](https://doi.org/10.1016/0094-5765(89)90106-9). Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0094576589901069>. Citado na p. 13.

SPACECRAFT Trajectory Optimization. [*S.l.*]: Cambridge University Press, 2010. (Cambridge Aerospace Series). Citado na p. 14.

Apêndice A - Tópicos de Dilema Linear

A.1 Uma Primeira Seção para o Apêndice

A matriz de Dilema Linear M e o vetor de torques inerciais b , utilizados na simulação são calculados segundo a formulação abaixo:

$$M = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} & M_{13} \\ M_{21} & M_{22} & M_{23} \\ M_{31} & M_{32} & M_{33} \end{bmatrix} \quad (\text{A.1})$$



FIGURA A.1 – Uma figura que está no apêndice

Anexo A - Exemplo de um Primeiro Anexo

A.1 Uma Seção do Primeiro Anexo

Algum texto na primeira seção do primeiro anexo.

FOLHA DE REGISTRO DO DOCUMENTO

1. CLASSIFICAÇÃO/TIPO TD	2. DATA 25 de março de 2015	3. DOCUMENTO Nº DCTA/ITA/DM-018/2015	4. Nº DE PÁGINAS 18
5. TÍTULO E SUBTÍTULO: Orbital Maneuver Optimization			
6. AUTOR(ES): Pedro Kuntz Puglia			
7. INSTITUIÇÃO(ÕES)/ÓRGÃO(S) INTERNO(S)/DIVISÃO(ÕES): Instituto Tecnológico de Aeronáutica – ITA			
8. PALAVRAS-CHAVE SUGERIDAS PELO AUTOR: Cupim; Cimento; Estruturas			
9. PALAVRAS-CHAVE RESULTANTES DE INDEXAÇÃO: Cupim; Dilema; Construção			
10. APRESENTAÇÃO: (X) Nacional () Internacional ITA, São José dos Campos. Curso de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Aeronáutica e Mecânica. Área de Sistemas Aeroespaciais e Mecatrônica. Orientador: Prof. Dr. Adalberto Santos Dupont. Coorientadora: Prof ^{ra} . Dr ^a . Doralice Serra. Defesa em 05/03/2015. Publicada em 25/03/2015.			
11. RESUMO: <p>Aqui começa o resumo do referido trabalho. Não tenho a menor idéia do que colocar aqui. Sendo assim, vou inventar. Lá vai: Este trabalho apresenta uma metodologia de controle de posição das juntas passivas de um manipulador subatuado de uma maneira subótima. O termo subatuado se refere ao fato de que nem todas as juntas ou graus de liberdade do sistema são equipados com atuadores, o que ocorre na prática devido a falhas ou como resultado de projeto. As juntas passivas de manipuladores desse tipo são indiretamente controladas pelo movimento das juntas ativas usando as características de acoplamento da dinâmica de manipuladores. A utilização de redundância de atuação das juntas ativas permite a minimização de alguns critérios, como consumo de energia, por exemplo. Apesar da estrutura cinemática de manipuladores subatuados ser idêntica a do totalmente atuado, em geral suas características dinâmicas diferem devido a presença de juntas passivas. Assim, apresentamos a modelagem dinâmica de um manipulador subatuado e o conceito de índice de acoplamento. Este índice é utilizado na sequência de controle ótimo do manipulador. A hipótese de que o número de juntas ativas seja maior que o número de passivas ($n_a > n_p$) permite o controle ótimo das juntas passivas, uma vez que na etapa de controle destas há mais entradas (torques nos atuadores das juntas ativas), que elementos a controlar (posição das juntas passivas).</p>			
12. GRAU DE SIGILO: <div style="display: flex; justify-content: space-around;">(X) OSTENSIVO() RESERVADO() SECRETO</div>			