

Danilo Almeida Bernardo

Análise de Dados de Força para Arquitecturas de Controlo

setembro 2016



UNIVERSIDADE DE COIMBRA



FCTUC FACULDADE DE CIÊNCIAS
E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

Análise de Dados de Força para Arquitecturas de Controlo

Danilo Almeida Bernardo

Coimbra, setembro 2016



Análise de Dados de Força para Arquitecturas de Controlo

Orientador:

Prof. Doutor Rui Pedro Duarte Cortesão

Júri:

Prof. Doutor Henrique José Almeida da Silva (Presidente)

Prof. Doutor Jaime Baptista dos Santos

Prof. Doutor Rui Pedro Duarte Cortesão

Dissertação submetida para a satisfação parcial dos requisitos do grau de Mestre em
Engenharia Electrotécnica e de Computadores.

Coimbra, setembro 2016

Agradecimentos

Ao Professor Doutor Rui Cortesão, o meu sincero obrigado, por meter motivado durante o meu percurso académico e me ter dado a oportunidade de realizar a dissertação de mestrado na área de robótica médica. Agradeço toda a sua disponibilidade, flexibilidade e toda a ajuda na conclusão do meu trabalho.

Ao Luís Santos, colega de laboratório, um eterno obrigado pela sua paciência, pelos conhecimentos que me transmitiu e pelas incontáveis horas em que me ajudou, actuando com um co-orientador, tendo um papel muito importante para o meu sucesso nesta etapa.

Ao Professor Doutor Tony Richard de Almeida, agradeço a disponibilidade que teve para me esclarecer certas dúvidas, esclarecimento esse que naquela altura tornou-se muito importante para a continuidade do trabalho.

À Margarida Martins, pela sua intervenção na etapa inicial desta dissertação. A sua disponibilidade e a forma como me integrou no laboratório foram essenciais para um bom arranque.

Ao meu grande amigo Ivo Ferreira, companheiro e colega em quase todos os trabalhos, um especial agradecimento pela sua amizade, pelo companheirismo, por estar sempre presente, e por toda a ajuda durante o meu percurso. O seu apoio foi fundamental para o meu sucesso académico. Será a pessoa a recordar quando daqui a uns anos se falar da vida académica.

Ao Rui Pires, André Conceição, Diogo Amorim, João Soares e Urbano Nunes amigos e companheiros nesta jornada de 5 anos por todo o suporte e companheirismo desde o primeiro até ao último momento. Costuma-se dizer que na universidade se fazem amizades para a vida e vocês são a prova disso.

Ao Diogo Cardoso, padrinho de praxe e grande amigo, pelo seu apoio desde o primeiro dia de universidade, que se mostrou fundamental para uma boa integração na vida académica e no curso.

Ao Xavier Costa, afilhado de praxe, por toda a amizade, paciência e confiança demonstrada e, por ser um óptimo colega de casa, fazendo com que a estadia em Coimbra fosse muito mais fácil.

À Daniela Troca por todo o seu carinho, suporte e dedicação durante a maior parte do percurso académico. Um muito obrigado por teres sempre acreditado em mim e me teres incentivado mesmo quando o rumo parecia perdido. Foste e sempre serás especial.

A todos os meus colegas de curso e todas as pessoas, que por um motivo ou outro, cruzaram o meu caminho, partilhando momentos e vivências um muito obrigado.

À minha irmã, Carla Bernardo, por sempre me incentivar e acreditar em mim, nunca me negando ajuda quando necessária.

Por fim, estarei eternamente grato aos meus pais, Jorge Bernardo e Rosa Bernardo. O seu grande apoio, incentivo constante, o facto de estarem sempre presentes mesmo quando não pedia nunca será esquecido. Tudo o que me ensinaram, os valores os princípios, o nunca desistir de lutar, levou-me a ser a pessoa que sou hoje e a alcançar esta etapa. Não é possível traduzir por palavras tudo o que fizeram por mim, o meu muito muito obrigado.

Resumo

É cada vez mais notória a presença da robótica na sociedade. É na indústria que esta presença é mais óbvia, mas, são muitas as novas áreas em que os robôs têm vindo a ganhar uma certa importância. Uma dessas áreas é a medicina, onde, ultimamente, os robôs têm aparecido de forma crescente, trazendo benefícios não só para os pacientes, ajudando na sua recuperação, mas também para os médicos, auxiliando-os em diversos procedimentos. No entanto, quando o médico utiliza o robô para procedimentos que envolvem contacto (e.g. ecografias, cirurgias), deixa de ser capaz de sentir as forças que está a exercer. Uma das formas de combater esse problema é através da inclusão de um sensor de força no robô. Contudo, a inclusão de mais um sensor pode ser problemática, sendo, por isso, importante encontrar um método alternativo para estimar as forças.

Este trabalho apresenta dois métodos usados para estimar as forças provenientes do contacto de um manipulador robótico com uma superfície. Para o primeiro método, é utilizado apenas o modelo dinâmico do robô e, para o segundo, é utilizado o método dos resíduos. O foco passa por descobrir se algum destes métodos poderá, eventualmente, substituir o sensor de força. De forma a ter a melhor estimação da força possível, é necessário um conhecimento exacto do modelo dinâmico do robô. Inicialmente em ambiente virtual, e, posteriormente, no robô real, são obtidas as forças envolvidas durante o contacto do robô com uma parede/superfície virtual. As forças exercidas na parede virtual pelo robô são comparadas com as estimadas através dos dois métodos acima referidos.

Para permitir que, na realização dos testes, a interacção do robô com o meio envolvente seja o mais estável e controlada possível, foi desenvolvido um controlo de impedância.

Para a obtenção dos dados, em termos de simulação, utilizou-se um simulador, para representar o robô *Wam 7DOF* e, durante os testes, foram alterados alguns parâmetros, tais como a rigidez da parede virtual, os ganhos dos filtros a que os dois métodos recorrem, as posições da parede virtual e as fricções do robô, de forma a testar o desempenho dos métodos. De notar que, todos estes testes foram previamente realizados em *MATLAB*, no

ambiente de simulação *Simulink*, de forma comprovar o seu bom funcionamento.

Foram, ainda, obtidos dados através da realização dos mesmos testes, anteriormente referidos, no robô real, onde foram comparadas as forças envolvidas na colisão com a mesma parede virtual, usando o robô real e o robô do simulador. Por fim, foram obtidas as forças usando directamente o sensor de força presente no robô real e feita uma análise desses resultados.

Palavras-chave: Robótica Médica, Manipulador Robótico, Estimação de Força, Parede Virtual, Sensor de Força, Fricções do Robô

Abstract

The presence of robotics is increasingly notorious in today's society. This presence is clearer in the industry, but there are many new fields in which robots have gained a certain importance. One of these is the medical field, in which, ultimately, robots have been appearing in increasing numbers, bringing benefits not only for the patients, helping their recovery, but also for the physicians, aiding in multiple procedures. However, when a physician uses a robot for procedures that involve physical contact (e.g. ultrasound, surgery), he loses the ability to feel the forces he exerts. One of the ways to combat this problem is through the implementation of force sensors. However, the implementation of more sensors can be problematic, making it of the utmost importance to find alternative methods to measure force.

This thesis presents two methods used to estimate forces resultant of contact between a robotic manipulator and a surface. For the first method, only the dynamic model of the robot is used and, for the second, we use the residue method. The focus is to discover if any of these has the ability to, eventually, replace a force sensor. To have the best possible force estimate, it is necessary to know the exact dynamic model of the robot. Initially in a virtual environment, and later, on the actual robot, we obtained the resulting forces of a contact between the robot and a wall/virtual surface. The resulting forces exerted on the virtual wall by the robot are then compared to the estimates resulting of the two methods previously mentioned.

To allow that, while the tests are being run, the interaction of the robot with its surroundings is as stable and controlled as possible, an impedance control was developed.

To gather data, in the simulation environment, a simulator was used, to represent the *Wam 7DOF robot*, and during testing, some parameters were adjusted, such as the rigidity of the virtual wall, the filter gains to which the two methods resorted to, the position of the virtual wall and the friction of the robot, to test the performance of the two methods. It is noteworthy that, all the tests were performed in *MATLAB*, in the *Simulink* simulation

environment, in the attempt to validate their good results.

Additional data was also retrieved through the same tests in the actual robot, in which the forces of the collision with the same virtual wall were compared, using the real robot and the simulated robot. Finally, the direct data of the forces using the sensor embedded in the real robot was retrieved and the data was later analysed.

Keywords: Medical Robotics, Robotic Manipulator, Force Estimation, Virtual Wall, Force Sensor, Friction Torques

"Everything is possible. The impossible just takes longer."

— Dan Brown, *Digital Fortress*

Conteúdo

Agradecimentos	ii
Resumo	v
Abstract	vii
Lista de Figuras	xiii
Lista de Tabelas	xv
1 Introdução	1
1.1 Motivação e Contexto	2
1.2 Objectivos	5
1.3 Estrutura da Dissertação	5
2 Estado de Arte	7
2.1 Cirurgia Robótica	7
2.2 Transmissão da Sensação de Força	8
3 Modelo do Robô	11
3.1 Introdução	11
3.2 Cinemática	11
3.2.1 Representação Eixo Ângulo	13
3.3 Dinâmica	14
3.3.1 Formulação do Modelo Dinâmico	15
3.3.2 Modelo Dinâmico no espaço das juntas	15
3.3.3 Modelo Dinâmico no espaço da tarefa	19

4	Controlo de Força	22
4.1	Controlo de Impedância	23
5	Técnicas de Estimação de Força	26
5.1	Soluções adoptadas	26
5.1.1	Técnica baseada no modelo dinâmico	26
5.1.2	Técnica baseada no método dos resíduos	27
6	Material e Validação Experimental	29
6.1	Material	29
6.1.1	Robô Manipulador 7 DOF WAM	29
6.1.2	Simulador e Phantom	30
6.2	Validação Experimental	31
7	Análise de resultados	36
7.1	Ambiente de Simulação	36
7.1.1	Estimação da força para trajectórias em x, y e z	36
7.1.2	Análise do efeito do ganho K_I na estimação	39
7.1.3	Análise do efeito da rigidez da parede virtual na estimação	40
7.2	Robô Real	42
7.2.1	Análise do desempenho dos estimadores usando Paredes Virtuais	42
7.2.2	Análise do efeito das forças de atrito na estimação	44
7.2.3	Comparação das forças estimadas com as obtidas pelo sensor de Força	46
8	Conclusão	49
8.1	Trabalho Futuro	50
9	Bibliografia	51

Lista de Figuras

1.1	Sistema Robótico Da Vinci [15]	4
3.1	Esquema de um manipulador com referenciais da base e do <i>end-effector</i> [31]	12
3.2	Rotação de um ângulo sobre um eixo [31]	13
4.1	Esquema do controlo de impedância sem sensor de força retirado de [7] . . .	23
6.1	Manipulador 7-DOF WAM	29
6.2	Janela do visualizador do Robô Manipulador	30
6.3	Phantom Desktop haptic device	31
6.4	Diagrama Simulink utilizando a estimação baseada no modelo dinâmico . .	32
6.5	Torques externos aplicados e sua estimação, usando a técnica (5.1.1).	32
6.6	Diagrama Simulink utilizando a estimação baseada na expressão (5.7). . . .	33
6.7	Gráfico dos torques externos aplicados e da sua estimação usando a equação (5.7) e um ganho de filtro de 100.	34
6.8	Diagrama Simulink utilizando a estimação baseada na equação (5.13)	34
6.9	Gráfico dos torques externos aplicados e da sua estimação usando a equação (5.13) e um ganho de filtro de 100.	35
7.1	Força gerada numa colisão com uma parede virtual no eixo x e respectivas estimações	36
7.2	Forças geradas durante o contacto do robô com paredes virtuais colocadas em x y z e respectivas estimações	37
7.3	Estimação usando o método dos resíduos para diferentes valores de K_I	39
7.4	Estimação usando o método dos resíduos para diferentes valores de rigidez da Parede Virtual	41
7.5	Força gerada numa colisão com uma parede virtual no eixo z e respectivas estimações	42

7.6	Força gerada numa colisão com uma parede virtual no eixo z e estimação usando o método dos resíduos	43
7.7	Estimação usando o método dos resíduos sem ter em conta as forças de atrito	44
7.8	Estimação usando o método dos resíduos tendo em conta as fricções viscosas	45
7.9	Estimação pelo o método dos resíduos para diferentes valores de fricções estáticas	46
7.10	Força obtida usando o sensor de força e respectiva estimação	47

Lista de Tabelas

1.1	Vantagens e desvantagens de usar um cirurgião, um robô e um sistema cirurgião-robô em procedimentos médicos [7].	3
7.1	Análise dos erros de estimação (média (avg), variância (var), módulo do valor máximo ($ \text{Max} $)) para diferentes valores de K_I	40
7.2	Análise dos erros de estimação (média (avg), variância (var), módulo do valor máximo ($ \text{Max} $)) para diferentes valores de rigidez das paredes	42
7.3	Análise dos erros de estimação (média (avg), variância (var), módulo do valor máximo ($ \text{Max} $)) para diferentes valores de fricções estáticas	45
7.4	Análise do erro de estimação (média (avg), variância (var), módulo do valor máximo ($ \text{Max} $)) usando o sensor de força	47

1 Introdução

Nas últimas décadas, tem se assistido a um forte desenvolvimento na área da Robótica, o que permitiu o aparecimento de novas tecnologias muito utilizadas hoje em dia. Tanto para auxiliar, como para substituir o ser humano em certas tarefas, os robôs são cada vez mais utilizados nas mais diversas áreas. É na indústria que se pode verificar uma maior presença da robótica, com a utilização de variados tipos de robôs para as mais variadas tarefas como pintar, aparafusar, soldar, transportar grandes cargas, entre outras.

Uma outra área em que a Robótica tem vindo a ganhar muita importância é na área médica onde, apesar de inicialmente, ter existido uma certa resistência, hoje em dia, já se observa uma grande inclusão da robótica na medicina, facto que pode ser explicado pelo sucesso que tem vindo a verificar-se em vários sectores como no diagnóstico e avaliação, no sector cirúrgico (cirurgias minimamente invasivas), na reabilitação, entre outros. Prevê-se que, nos próximos anos, com o aumento da receptividade das pessoas e com o avanço das tecnologias, a robótica médica terá cada vez mais impacto e será cada vez mais usada. Estes factos despertam o interesse em ir mais além nesta área.

1.1 Motivação e Contexto

Visto que são muitos os sectores em que a robótica médica está presente, torna-se útil dividi-la de acordo com a sua área de intervenção final [7], [10]:

Robótica centrada no paciente:

- Robótica de assistência

Robôs ou aparelhos mecatrónicos que aumentam a qualidade de vida de pessoa com deficiência ou de idosos, aumentando, assim, a sua independência.

- Robótica de reabilitação

Robôs e aparelhos mecatrónicos usados para terapias clínicas e reabilitação neuromotora.

Robótica centrada no médico:

- Robótica não cirúrgica

Robôs ou aparelhos mecatrónicos utilizados para diagnóstico

- Robótica cirúrgica

Robôs e aparelhos mecatrónicos utilizados em cirurgia. Estes podem ser usados em telemanipulação [9], onde o médico manipula um interface que transmite comandos a um robô ou em co-manipulação [33], onde o controlo é partilhado entre o médico e o robô, ou seja, o robô auxilia o médico durante o procedimento.

Tendo como foco a robótica centrada no médico, mais concretamente a robótica cirúrgica, consegue perceber-se que a junção de médicos e robôs como forma de complementaridade pode trazer inúmeras vantagens tanto para o médico como para o paciente. Na tabela seguinte, estão resumidas as vantagens e desvantagens da realização de um procedimento usando, individualmente, o cirurgião e o robô e usando ambos.

Realização de um procedimento médico usando:	Vantagens	Desvantagens
Cirurgião	Excelente julgamento; Boa coordenação olhos-mãos; Capacidade de improviso e versatilidade; Capacidade de aprendizagem e raciocínio;	Sujeito a fadiga; Sujeito a tremores; Precisão limitada; Sujeito a radiações;
Robô	Excelente precisão; Não sujeito a fadiga; Imune a radiações e infecções; Possibilidade de trabalhar em ambientes hostis; Preciso no controlo das forças;	Incapacidade de improvisar; Dificuldade em adaptação a novas situações; Incapacidade de decidir por si; Necessidade de áreas maiores de trabalho; Custo de aquisição e manutenção elevados;
Cirurgião e Robô	Compensação dos tremores; Melhor precisão; Estabilidade nos movimentos; Melhor conforto para o médico; Para o paciente: Redução da dor e desconforto pós operatório; Redução do risco de infecções; Redução no tempo em hospital; Recuperação mais rápida;	Custo de aquisição e manutenção elevados; Treino adicional do staff; Necessidade de áreas maiores de trabalho;

Tabela 1.1: Vantagens e desvantagens de usar um cirurgião, um robô e um sistema cirurgião-robô em procedimentos médicos [7].

Um outro problema que não está directamente associado a estas comparações, mas que tem elevada importância é o problema das esterilizações pois, com a inclusão de um robô no bloco operatório, existe a constante necessidade de o manter esterilizado de forma a não infectar o paciente.

Analisando a tabela, é possível concluir que, se o cirurgião deixar de operar individualmente e estabelecer uma parceria com o robô, são muitos os benefícios que daí advêm. Os problemas individuais de cada um são combatidos, aumentando, assim, as vantagens e diminuindo as limitações, levando a procedimentos menos invasivos e com maior precisão e qualidade. Das vantagens destaca-se, por exemplo, a possibilidade de o robô ajudar a resolver o problema da coordenação olhos-mãos em cirurgias minimamente invasivas. É também possível compensar os movimentos não desejados tanto do médico como do paciente, limitar o risco em regiões vitais visto que um robô pode trabalhar em aberturas cirúrgicas muito menores, e até pode ser usado como uma terceira mão.

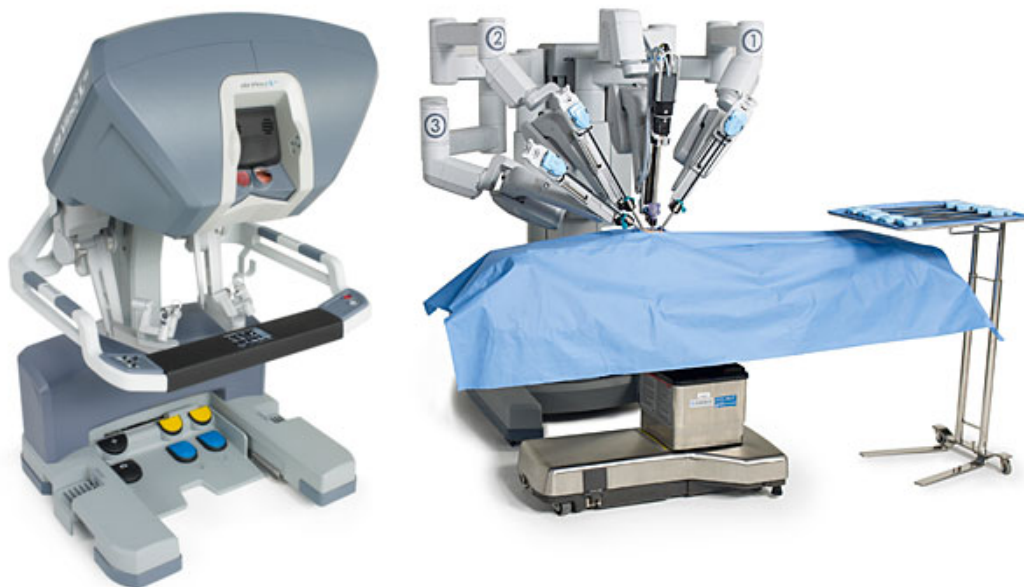


Figura 1.1: Sistema Robótico Da Vinci [15]

No entanto, nesta parceria cirurgião-robô surge uma limitação directamente associada ao cirurgião. Desde operações, até simples ecografias, a maioria das tarefas médicas envolvem contacto, pelo que é importante ter sempre presente a sensação da força que se está a exercer durante o mesmo. Com a inclusão do robô, o cirurgião perde essa capacidade, não tendo a total noção das forças que está a exercer. Para ecografia, uma ligeira variação na força exercida no paciente pode não ser muito crítica, mas, se essa mesma variação acontecer durante uma cirurgia, já poderá ter uma elevada importância. Tomando o exemplo da cirurgia, quando o cirurgião se encontra a operar sozinho, recorre ao uso das suas próprias mãos, o que lhe permite ter a sensação do toque, sabendo a força que está a exercer ou sentindo a tensão do tecido. O mesmo não acontece quando se encontra em parceria com o robô, visto que o cirurgião, ao utilizar o robô para operar, as suas mãos servem para o controlar não estando directamente em contacto com o paciente, perdendo, assim, a sensação táctil. Esta perda é um grande problema pois toda a operação estará dependente das habilidades do cirurgião, existindo sempre a possibilidade de este interagir com demasiada força com o tecido causando certos danos ou até mesmo, apesar de ter dispositivos avançados para a visualização do local onde está a operar, não ser capaz de descobrir tumores que possam estar abaixo da superfície do tecido e que, com uma simples sensação de toque seriam facilmente identificáveis.

De forma a combater este problema, têm sido estudadas técnicas para estimar a força exercida pelo robô e transmiti-la ao cirurgião, de maneira a que este recupere a sensação de toque. Algumas dessas técnicas, [30], [17], visam a inclusão de um sensor de força no

end-effector ou na pinça que entra em contacto com o paciente. Mas, com a inclusão de mais um sensor, surgem logo certos problemas, como o custo do sensor, a sua fiabilidade e, naturalmente, como é mais uma peça para o robô, será mais uma peça a ter de ser esterilizada e mais uma possível fonte de ruído.

Com o aparecimento do trabalho de investigação [21], surgiu, então, a ideia de que, em vez de estimar directamente as forças recorrendo ao sensor, tentar estimar apenas através do uso dos modelos e matrizes do robô, utilizando, para isso, apenas as medidas das posições das juntas. É desta perspectiva que surge a motivação de desenvolver trabalho nesta área.

1.2 Objectivos

O objectivo deste trabalho passa por estimar, sem recorrer a um sensor de força, as forças provenientes do contacto do robô com uma superfície presente no ambiente que o rodeia. Para isso, serão usados dois métodos, o método baseado nos resíduos [21] e o método tendo em conta apenas o modelo dinâmico do robô.

Inicialmente, em ambiente virtual, deseja-se obter as forças envolvidas durante a colisão do robô com uma parede/superfície virtual e comparar a força exercida durante esse contacto com a estimada através dos dois métodos anteriormente referidos. De seguida, os mesmos testes serão realizados no robô real e o objectivo passa por comparar para a mesma trajectória, ou seja, para o mesmo tipo de contacto, as forças estimadas através dos métodos acima referidos e as forças obtidas directamente pelo sensor de força presente no robô, com a finalidade de chegar à conclusão se este último pode ser substituído por algum dos métodos de estimação.

1.3 Estrutura da Dissertação

Este documento de dissertação começa por introduzir ao leitor o tema que vai ser abordado, explicando o que é a robótica médica e qual a sua importância. Ainda neste capítulo introdutório é feita a ponte entre a robótica médica e o assunto desenvolvido nesta dissertação e explicada a motivação que levou ao seu estudo.

Seguidamente, no capítulo 2, são fornecidas ao leitor informações sobre o que já foi investigado no passado sobre o tema da dissertação por outros autores e são, ainda, apresentados os principais fundamentos essenciais para a compreensão deste trabalho.

No capítulo 3 é feita uma introdução teórica à modelagem do manipulador robótico, onde se

podem encontrar as deduções dos modelos dinâmicos tanto para o espaço das juntas, como para o espaço da tarefa e ainda um breve resumo sobre a cinemática do robô.

Após isto, no capítulo 4, é apresentado o tipo de controlo usado no robô e os seus fundamentos teóricos. Em 5, são apresentadas as duas técnicas usadas para estimar a força e é detalhado como são implementadas, No capítulo 6 é apresentado o material que irá ser usado para os testes e é feita a validação experimental dos métodos de estimação. Em 7 são feitas as simulações e analisados os resultados obtidos.

Por fim, no capítulo 8 são retiradas as conclusões finais e é realizada uma reflexão sobre o trabalho futuro que pode ser realizado com base no que aqui foi desenvolvido.

2 Estado de Arte

No sentido de contextualizar o leitor relativamente ao trabalho já desenvolvido na área, nesta secção, é dada uma visão global sobre o estado de arte. Desta forma, pretende-se apresentar não só o tema mas também os principais avanços científicos já obtidos no seu âmbito.

2.1 Cirurgia Robótica

O desenvolvimento de sistemas robóticos para cirurgia teve, na década de 80, o seu grande início, quando o departamento de defesa dos Estados Unidos Da América desenvolveu um veículo móvel, blindado, equipado com manipuladores robóticos cirúrgicos, chamado de SRI Green telepresence Surgery System [26]. A ideia era este veículo ser introduzido em ambientes hostis e, como seria controlado remotamente por um cirurgião, poderia fornecer assistência cirúrgica imediata de forma a tratar ferimentos mais graves até ser possível deslocar a vítima a um hospital. Esse projecto, porém, não foi adiante, devido às limitações na velocidade de transmissão de dados. Não obstante, foi através desta ideia inicial que a cirurgia robótica iniciou a sua evolução.

O primeiro sistema robótico aplicado num procedimento cirúrgico foi o PUMA 560, um braço robótico industrial que foi modificado de forma a orientar uma agulha para uma biópsia ao cérebro, com uma precisão de 0.05 mm [12]. Desde então, o uso da robótica para cirurgia teve um forte desenvolvimento e ampliação sendo aplicada as várias áreas da medicina. Em 1992, foi construído um sistema cirúrgico integrado, chamado de ROBODO, para cirurgia ortopédica, usado na cirurgia de substituição da anca. Ao mesmo tempo, foi, também desenvolvido, outro sistema, o PROBOT, para prostatectomias [13]. Um pouco mais tarde, foi criado um sistema de endoscopia automático para posicionamento ideal, o AESOP, um braço robótico com a finalidade de controlar a câmara de endoscopia, podendo, assim, substituir o assistente cirúrgico [3].

Em 1997, uma empresa denominada de Intuitive Surgical Inc desenvolveu o sistema

cirúrgico telerobótico, com a designação da Vinci, 1.1 , no qual um cirurgião estaria localizado numa consola equipada com um sistema de projecção a 3 dimensões onde, através de dois manipuladores, movimentava dois braços robóticos equipados com instrumentos cirúrgicos, de forma a realizar uma cirurgia minimamente invasiva. Este é o robô mais usado hoje em dia nas cirurgias robóticas. Em 1999, uma outra empresa chamada de Computer Motion, introduziu um sistema similar, denominado Zeus, que apenas se diferenciava do Robô da Vinci na consola do cirurgião e que, mais tarde, viria a desaparecer [12].

2.2 Transmissão da Sensação de Força

Apesar de todos os benefícios subjacentes à cirurgia robótica, existe um grande problema, principalmente para o cirurgião, tal como já foi referido anteriormente, a questão da falta de sensibilidade táctil. De forma a combater este problema, foram realizados vários estudos e investigações com o intuito de transmitir as forças envolvidas durante a cirurgia para os manipuladores do cirurgião.

Um grupo de investigadores da Universidade de Harvard [38] concluiu que ter feedback de força em tarefas de dissecação permite reduzir consideravelmente o trauma no tecido e os danos em estruturas sensíveis, como as artérias, aumentando a competência do sistema robótico cirúrgico. Kazi [16] demonstrou que o desempenho numa inserção de um cateter feita por um robô operado remotamente aumenta substancialmente, se o operador conseguir sentir as forças envolvidas no processo.

Provados os benefícios associados a ter feedback de forças, surgiram várias investigações sobre qual seria a melhor forma de readquirir a sensibilidade táctil.

Berkelman et al. [5] desenvolveram um sensor de força miniatura, para medir as forças de contacto na ponta do instrumento cirúrgico em 3 dimensões. Este sensor foi projectado para ser montado dentro do instrumento cirúrgico ou no *end-effector* do robô de forma a medir as forças na ponta dos instrumentos em todos os três eixos com uma resolução na ordem dos milímetros de Newton. Também Puangmali et al [28] criaram um sensor miniatura de força de 3 eixos para procedimentos, de palpação dos tecidos, minimamente invasivos, utilizado para medir as forças presentes na ponta do instrumento cirúrgico durante uma interacção com os tecidos. Este sensor tinha algumas características interessantes pois, como não tinha nenhuma parte metálica na sua constituição, poderia ser utilizado durante ressonâncias magnéticas.

Nestes trabalhos, os sensores de força foram desenvolvidos para serem inseridos nos ins-

trumentos cirúrgicos. No entanto, certos autores pensaram em vez de criar um sensor para inserir no instrumento, criar um novo instrumento com todas as características necessárias.

Desta forma, Valdastrì et al. [37] fabricaram um instrumento de corte, com um sensor de força de 3 eixos, para ser aplicado em procedimentos de cirurgia fetal. Kuebler et al. [19] criaram uma ferramenta minimamente invasiva constituída por uma unidade de propulsão, juntas articuladas, um sensor de força e uma pinça que proporciona não só as sensações tácteis, mas também grande destreza ao cirurgião, quando este se encontra a operar dentro do paciente. Rosen et al. [29] desenvolveram uma pinça cirúrgica endoscópica com feedback de forças, que pode controlar as forças de pressão quer por controlo directo do cirurgião, quer por controlo de software.

King et al. [18] trouxeram uma nova abordagem, baseada no desenvolvimento completo de um sistema de feedback táctil, que consistia num sensor de força piezoresistivo, num sistema de controlo e num balão pneumático, montados directamente no sistema robótico cirúrgico da Vinci. Este sistema permitia ao utilizador sentir as diferentes pressões exercidas no balão que correspondiam directamente às diferentes forças aplicadas na pinça.

Para além do desenvolvimento de novas ferramentas, certos investigadores foram mais além e apresentaram propostas para o desenvolvimento de novos robôs capazes de transmitir sensações ao cirurgião. É o caso de Uneri et al. [36], que desenvolveram um robô cooperativo para micro cirurgia com um mecanismo de centro de movimento remoto e um gancho cirúrgico integrado capaz de transmitir forças. Este robô destina-se a cirurgias de retina e Vítreo. Também Zemiti et al. [39] apresentaram um novo robô para cirurgias minimamente invasivas, leve e compacto, que permite a manipulação de forças. Uma grande vantagem deste robô é que não tinha nenhum sensor de força integrado nos seus instrumentos cirúrgicos. Em vez disso, fora do paciente, um sensor de força normal é interligado a uma ferramenta, chamada de trocar, o que permitia a medição sem perturbações das forças envolvidas na manipulação.

Apesar de todas estas técnicas ou novos robôs que surgiram terem conseguido devolver ao cirurgião a sensibilidade táctil, continuam a persistir dois problemas. Os elevados custos dos sensores de força que são introduzidos nas ferramentas e a questão das esterilizações, pelo que seria útil arranjar outra técnicas que não envolvessem o uso de sensores de força.

De Luca e Mattone [22] investigaram a possibilidade de detectar uma colisão sem recorrer ao uso de sensores. A ideia era tratar uma colisão num ponto genérico do robô, como se se tratasse de uma falha no seu sistema de actuação e usar uma técnica de falsa detecção e isolamento que nao recorreria nem a acelerações nem a medidas de força.

Mais recentemente, De Luca e Flacco [21] propuseram um método para estimar as forças sem recorrer a um sensor, onde apenas seria necessário um conhecimento preciso do modelo dinâmico do robô visto, que, para a estimação, seriam usadas apenas as medidas das posições das juntas. Este é um dos métodos analisados neste trabalho.

Por fim, e caso o leitor queira obter um conhecimento mais profundo sobre o estado de arte das técnicas de obtenção de força em cirurgias minimamente invasivas poderá consultar [27].

3 Modelo do Robô

3.1 Introdução

Um robô manipulador é uma estrutura mecânica composta por um conjunto de elos ligados entre si por várias juntas movidas por actuadores [34]. Tanto os elos como as juntas são o mais rígidos possível, de forma a aumentar a precisão da posição do robô. Uma das extremidades da cadeia de elos está ligada a uma base de suporte, enquanto a outra está livre. Esta extremidade livre é constituída por um dispositivo desenvolvido para interagir com o ambiente, tanto para a manipulação de objectos, como para a realização de certas tarefas, denominado *end-effector*. É neste dispositivo que, normalmente, culmina todo o movimento do robô. Os movimentos combinados nas juntas levam ao movimento dos elos do manipulador que fazem com que o *end-effector* se coloque numa determinada localização (posição e orientação), também chamada de pose.

Em todas as aplicações robóticas, a conclusão de uma tarefa genérica requer a execução de um determinado movimento por parte do robô. A execução correcta de tal movimento é confiada ao sistema de controlo que deve fornecer aos actuadores do robô os comandos compatíveis com o movimento desejado. O controlo do movimento exige uma análise precisa das características da estrutura mecânica bem como dos actuadores e dos sensores, pelo que a modelação do robô (através da cinemática e da dinâmica deste) é de extrema importância.

3.2 Cinemática

A cinemática tem como objectivo o estudo da geometria do movimento do robô, isto é, a relação geométrica entre a pose (posição e orientação) do *end-effector* e a variação nas juntas no respectivo referencial. Considerando q vector ($n \times 1$) das variáveis das juntas e p_e vector da posição cartesiana, através da cinemática é possível, sabendo a posição das juntas, obter a posição cartesiana ($q \rightarrow p_e$) sendo esta transformação obtida através da cinemática

directa ou, inversamente, sabendo a posição cartesiana, obter a posição das juntas ($p_e \rightarrow q$), transformação esta obtida através da cinemática inversa. De notar que a transformação através da cinemática directa é, na maioria das vezes, calculada usando a convenção de Denavit-Hartenberg [20].

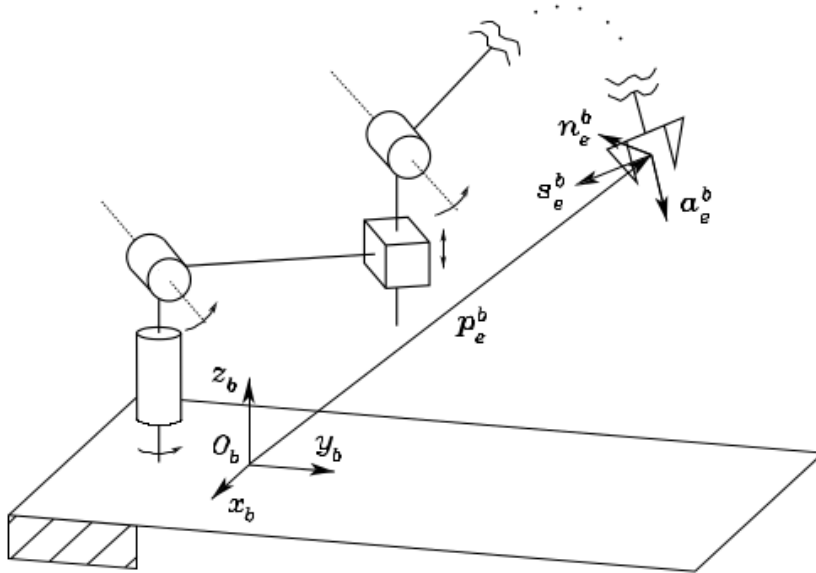


Figura 3.1: Esquema de um manipulador com referenciais da base e do *end-effector* [31]

Na figura 3.1, é possível observar a descrição da posição e orientação do *end-effector*. Sabendo que a localização no espaço de um corpo rígido pode ser descrita através de um vector de posição p e de uma matriz de rotação R , que descreve a origem e orientação no referencial do *end-effector* em relação a um referencial de base fixa, é possível definir a matriz de rotação do *end-effector*, R_e , como:

$$R_e = \begin{bmatrix} n_e & s_e & a_e \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

onde n_e, s_e, a_e são vectores unitários no eixo do referencial do *end-effector*. Assim, com p_e e R_e mapeia-se o referencial do *end-effector* no referencial da base. Por fim, em relação ao referencial da base, é possível expressar a função de cinemática directa através da matriz de transformação homogénea:

$$T_e^b(q) = \begin{bmatrix} n_e^b & s_e^b & a_e^b & p_e^b \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

onde, n_e, s_e, a_e, p_e são em função de q .

Como foi visto anteriormente, a transformação entre dois espaços cartesianos pode ser decomposta numa parte de translação e numa parte de rotação. Tendo em atenção a parte

de rotação, existem várias formas de representá-la, tais como os ângulos de Euler, o vector de Gibbs, os parâmetros de Cayley-Klein, o eixo e ângulo e o unit quaternion [1]. Para este trabalho, o método utilizado foi o eixo e ângulo.

3.2.1 Representação Eixo Ângulo

Uma representação da orientação pode ser obtida através do recurso a quatro parâmetros que expressam a rotação de um dado ângulo sob um eixo no espaço. Segundo o Teorema de Euler, qualquer rotação de um corpo rígido pode ser descrita através de uma rotação sobre um eixo fixo.

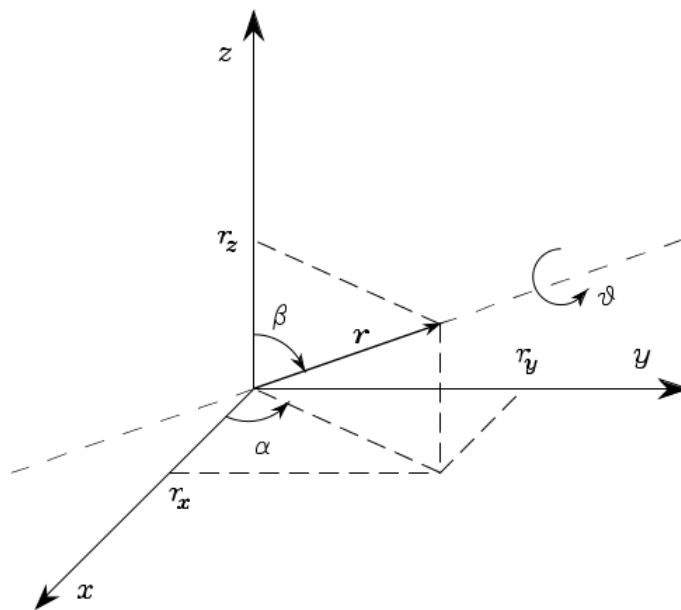


Figura 3.2: Rotação de um ângulo sobre um eixo [31]

Observando a figura 3.2, consideremos que:

$$r = \begin{bmatrix} r_x \\ r_y \\ r_z \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

onde r é o vector unitário de um eixo de rotação em relação ao eixo base $Oxyz$. Para construir a matriz de rotação $R(\theta, r)$, fazem-se, em primeiro lugar, simples rotação sobre o eixo base. O ângulo de rotação será positivo se e as rotações forem feitas no sentido anti-horário em relação ao eixo do vector r . Assim, uma possível solução é rodar r através dos ângulos necessários de forma a alinhá-lo com o eixo z . Após isso rodar, θ sobre o eixo z

e, por fim, rodar através dos ângulos necessários, de forma alinhar o vector unitário com a direcção inicial. Com isto, a matriz de rotação é dada por:

$$R(\theta, r) = R_z(\alpha)R_y(\beta)R_z(\theta)R_y(-\beta)R_z(-\alpha) \quad (3.4)$$

De forma a eliminar as dependências dos ângulos, partindo das componentes do vector unitário r , (3.3), é possível retirar as relações entre estes, sendo:

$$\sin \alpha = \frac{r_y}{\sqrt{r_x^2 + r_y^2}} \quad \cos \alpha = \frac{r_x}{\sqrt{r_x^2 + r_y^2}} \quad \sin \beta = \sqrt{r_x^2 + r_y^2} \quad \cos \beta = r_z \quad (3.5)$$

Assim, conclui-se que a matriz de rotação para um dado ângulo e eixo é dada por:

$$R(\theta, r) = \begin{bmatrix} r_x^2(1 - c_\theta) + c_\theta & r_x r_y(1 - c_\theta) - r_z s_\theta & r_x r_z(1 - c_\theta) + r_y s_\theta \\ r_x r_y(1 - c_\theta) + r_z s_\theta & r_y^2(1 - c_\theta) + c_\theta & r_y r_z(1 - c_\theta) - r_x s_\theta \\ r_x r_z(1 - c_\theta) - r_y s_\theta & r_y r_z(1 - c_\theta) + r_x s_\theta & r_z^2(1 - c_\theta) + c_\theta \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

onde c e s representam, respectivamente, cosseno e seno. Esta matriz tem, ainda, a seguinte propriedade:

$$R(-\theta, -r) = R(\theta, r) \quad (3.7)$$

ou seja, uma rotação de $-\theta$ sobre $-r$ não pode ser distinguida de uma rotação de θ sobre r . Este problema pode ser ultrapassado recorrendo a outra representação, tal como o unit quaternion, mas não é objectivo deste trabalho explorar esta matéria. Apesar disso, esta propriedade não tem qualquer influência neste trabalho pois é garantido que o robô não tem um comportamento ambíguo [32], sendo, assim, utilizada a representação eixo ângulo pois é mais simples.

3.3 Dinâmica

Construir o modelo dinâmico do manipulador é algo muito importante na simulação de robôs. Enquanto que as equações cinemáticas apenas descrevem o movimento do robô sem ter em consideração as forças produzidas durante esse movimento, as equações dinâmicas descrevem a relação entre as forças e o movimento. De forma resumida, o modelo dinâmico permite identificar a relação entre as forças exercidas no robô e o movimento (posição das juntas, velocidade e aceleração). Este executa um papel crucial na simulação de movimentos, na análise de estruturas de manipuladores e na construção de algoritmos de controlo [34].

Simulações do movimento do manipulador permitem que sejam testadas técnicas de controlo e de planeamento de movimento sem a necessidade de recorrer a um sistema físico.

Visto que o foco deste trabalho é a estimação do efeito das forças externas provenientes de uma colisão durante o movimento do robô, a análise do modelo dinâmico torna-se muito útil.

3.3.1 Formulação do Modelo Dinâmico

Existem dois métodos para a construção do modelo dinâmico: o método pela formulação de Lagrange, conceptualmente simples e sistemático, e o método baseado na formulação de Newton-Euler, obtido de forma recursiva e computacionalmente mais eficiente.

O modelo dinâmico pode, ainda, ser calculado no espaço das juntas, onde a tarefa é especificada através da posição de cada junta e, com isso, é possível saber a posição de cada elo, ou calculado no espaço de tarefa, onde a tarefa é especificada através da posição do *end-effector*. Neste trabalho, o modelo dinâmico é obtido através do método pela formulação de Lagrange, explicado de seguida tanto para o espaço das juntas, como para o de tarefa.

3.3.2 Modelo Dinâmico no espaço das juntas

Definindo q_i , $i=1,\dots,n$, como as coordenadas generalizadas que descrevem a posição dos elos do manipulador e n como o número de elos rígidos do robô, é possível definir o Lagrangiano do sistema mecânico [24] como :

$$L = T - U \quad (3.8)$$

onde T e U são, respectivamente, a energia cinética total e energia potencial do sistema.

As equações de Lagrange são expressas por:

$$\frac{d}{dt} \frac{\delta L}{\delta \dot{q}_i} - \frac{\delta L}{\delta q_i} = \xi_i \quad (3.9)$$

onde ξ_i é a força generalizada associada a coordenada generalizada q_i .

De forma a poder definir o modelo dinâmico completamente, é importante determinar primeiro a energia cinética e a potencial do sistema mecânico.

A energia cinética total é obtida através da soma das contribuições do movimento de cada elo e de cada actuador de junta (rotor) e é dada por:

$$T = \sum_{i=1}^n (T_{li} + T_{mi}) \quad (3.10)$$

onde T_{li} é a energia cinética do elo i e T_{mi} a do motor que actua a junta i .

A contribuição do elo i para a energia cinética é obtida através de:

$$T_{li} = \frac{1}{2} \int_{V_{li}} \dot{p}_i^{*T} \dot{p}_i^* \rho dV \quad (3.11)$$

em que \dot{p}_i^* representa o vector da velocidade linear, ρ é a densidade da partícula do volume dV e V_{li} é o volume do link i . Esta contribuição pode ainda ser expressa como a soma das contribuições translacionais e rotacionais dos elos :

$$T_{li} = \frac{1}{2} m_{li} \dot{p}_{li}^T \dot{p}_{li} + \frac{1}{2} w_i^T R_i I_{li}^i R_i^T w_i \quad (3.12)$$

com p_{li} sendo a velocidade linear do centro de massa do link i , R_i a matriz de rotação do link i em relação ao eixo base, I_i o tensor de inercia [2] e w_i a velocidade angular do link i .

A contribuição para a energia cinética do rotor i é dada por:

$$T_{mi} = \frac{1}{2} m_{mi} \dot{p}_{mi}^T \dot{p}_{mi} + \frac{1}{2} w_{mi}^T I_{mi} w_{mi} \quad (3.13)$$

onde m_{mi} é a massa do rotor i , p_{mi} é a velocidade linear do centro de massa do rotor i , I_{mi} é o tensor de inercia do rotor i relativamente ao seu centro de massa e w_{mi} denota a velocidade angular do rotor i .

Assim, somando as várias contribuições relativas aos elos (3.12) e aos rotores (3.13), a energia cinética total é dada por:

$$T = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n b_{ij} \dot{q}_i \dot{q}_j = \frac{1}{2} \dot{q}^T M(q) \dot{q} \quad (3.14)$$

onde $M(q)$ é a matriz inércia ($n \times n$) e tem como propriedades ser simétrica, definida positiva e genericamente dependente da configuração [7].

Tal como para a energia cinética, a energia potencial armazenada no manipulador é obtida pela soma das contribuições de cada elo e de cada rotor e é dada por:

$$U = \sum_{i=1}^n (U_{li} + U_{mi}) \quad (3.15)$$

Assumindo que os elos são rígidos, a contribuição destes deve-se apenas às forças gravitacionais e é expressa por:

$$U_{li} = - \int_{V_{li}} g_0^T p_i^* \rho dV = -m_{li} g_0^T p_{li} \quad (3.16)$$

onde g_0 é o vector de aceleração de gravidade no referencial de origem, ou seja:

$$g_0 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -g \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

Quanto à contribuição do Rotor i, é dada por:

$$U_{mi} = -m_{mi} g_0^T p_{mi} \quad (3.18)$$

Substituído (3.16) e (3.18) em (3.15), tem-se que a energia potencial é dada por:

$$U = - \sum_{i=1}^n (m_{li} g_0^T p_{li} + m_{mi} g_0^T p_{mi}) \quad (3.19)$$

o que permite concluir que a energia potencial não depende da velocidade das juntas \dot{q} , dependendo apenas da configuração das juntas q , ou seja, $U=U(q)$.

Tendo já determinado a energia cinética e potencial total do sistema, o Lagrangiano (3.8) pode ser escrito como:

$$L(q, \dot{q}) = T(q, \dot{q}) - U(q) \quad (3.20)$$

Relacionando (3.9) e (3.14) e sabendo que U não depende de \dot{q} tem-se que:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\delta L}{\delta \dot{q}_i} \right) = \frac{d}{dt} \left(\frac{\delta T}{\delta \dot{q}_i} \right) = \sum_{j=1}^n b_{ij}(q) \ddot{q}_j + \sum_{j=1}^n \frac{db_{ij}(q)}{dt} \dot{q}_j \quad (3.21)$$

resultando assim em:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\delta L}{\delta \dot{q}_i} \right) = \sum_{j=1}^n b_{ij}(q) \ddot{q}_j + \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n \frac{\delta b_{ij}(q)}{\delta q_k} \dot{q}_k \dot{q}_j \quad (3.22)$$

$$\frac{\delta T}{\delta q_i} = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n \frac{\delta b_{jk}(q)}{\delta q_i} \dot{q}_k \dot{q}_j \quad (3.23)$$

e ainda:

$$\frac{\delta U}{\delta q_i} = - \sum_{j=1}^n \left(m_{lj} g_0^T \frac{\delta p_{lj}}{\delta q_i} + m_{mj} g_0^T \frac{\delta p_{mj}}{\delta q_i} \right) = g_i(q) \quad (3.24)$$

Por fim, reescrevendo (3.9) com (3.22), (3.23) e (3.24) tem-se que o modelo dinâmico é dado por:

$$\sum_{j=1}^n b_{ij}(q)\ddot{q}_j + \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n h_{ijk}(q)\dot{q}_k\dot{q}_j + g_i(q) = \xi_i \quad (3.25)$$

onde

$$h_{ijk} = \frac{\delta b_{ij}}{\delta q_k} - \frac{1}{2} \frac{\delta b_{jk}}{\delta q_i} \quad (3.26)$$

e sendo b_{ii} o coeficiente que simboliza o momento de inércia da junta i , b_{ij} o coeficiente que tem em conta o efeito da aceleração da junta i na junta j , $h_{ijk}(q)\dot{q}_k\dot{q}_j$, o que representa o efeito de *Coriolis* [25] induzido na junta i pela velocidade das juntas j e k e g_i o que representa o momento gerado na junta i pela presença da gravidade.

Na forma matricial, o modelo dinâmico é dado por:

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + g(q) + d(\dot{q}, q) = \tau \quad (3.27)$$

em que $C(q, \dot{q})$ representa os termos centrípetos e a Coriolis, $g(q)$ é o termo de gravidade, $d(\dot{q}, q)$ é o vector das forças de atrito, sendo considerado ao longo deste trabalho como a soma das contribuições das fricções viscosas, F_v , e das fricções estáticas, F_s , podendo assim rescrever o modelo dinâmico como:

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + g(q) + F_v\dot{q} + F_s \text{sgn}(\dot{q}) = \tau \quad (3.28)$$

onde $\text{sgn}(\dot{q})$ é uma função que extrai o sinal das velocidades das juntas. O τ é o torque generalizado aplicado as juntas do robô. Este é dado pela soma dos torques a actuar nas juntas:

$$\tau = \tau_c + \tau_e + \tau_f \quad (3.29)$$

sendo τ_c o torque de comando enviado aos motores das juntas, τ_e o torque externo que é induzido nas juntas por contacto do robô com o meio envolvente e τ_f o torque de atrito nas juntas que, por ser de valor baixo e de difícil modelação, é muitas vezes ignorado.

Ainda sobre o torque externo, se for admitido que $F_k \in \mathbb{R}^{m_k}$ é uma força externa aplicada a um ponto genérico do robô e que $J_k(q)$ é a matriz Jacobiana, $m_k \times n$, associada a esse mesmo ponto de contacto do robô, então o torque externo será dado pela expressão:

$$\tau_{ext} = J_k^T(q)F_k \quad (3.30)$$

3.3.3 Modelo Dinâmico no espaço da tarefa

Para este trabalho, é útil ter o modelo dinâmico mapeado no espaço da tarefa pois, como o controlo é feito nesse mesmo espaço, é importante saber a relação entre a força generalizada que actua no robô e a variável que representa a pose do *end-effector*. Existem dois tipos de dinâmica no espaço de tarefa, a dinâmica para robôs redundantes e para robôs não redundantes. Neste caso, e como está explicado mais à frente, o robô utilizado é um robô redundante visto que tem 7 graus de liberdade. Assim, de forma a relacionar os dois espaços (juntas e tarefa), é necessário recorrer à ajuda do Jacobiano e da equação diferencial da cinemática.

O Jacobiano do manipulador ou matriz Jacobiana é uma ferramenta importante para a análise e controlo do robô. Este é usado no planeamento de trajectórias, na determinação de singularidades, análise de redundâncias, algoritmos implícitos de cinemática inversa, entre outros. O Jacobiano [11], J , é uma matriz $(6 \times n)$ constituída pelas contribuições das velocidades lineares, J_v e angulares, J_w , das juntas. Este mapeia deslocamentos diferenciais nas juntas (dq) em deslocamentos diferenciais na tarefa (dX).

A equação diferencial da cinemática [8] está relacionada com o Jacobiano e é dada por:

$$dX = J(q)dq \quad (3.31)$$

que pode ser reescrita na forma:

$$\dot{X} = J(q)\dot{q} \quad (3.32)$$

Através da equação (3.27), e desprezando as forças de atrito, é possível obter a aceleração das juntas, sendo esta dada por:

$$\ddot{q} = -M^{-1}(q)C(q, \dot{q}) - M^{-1}(q)g(q) + M^{-1}(q)\tau \quad (3.33)$$

Sabendo a relação entre a velocidade no espaço da tarefa e no das juntas (3.32), derivando-a, obtém-se a relação entre as acelerações nesses mesmos espaços:

$$\ddot{X} = J(q)\ddot{q} + \dot{J}(q, \dot{q})\dot{q} \quad (3.34)$$

Observando atentamente pode concluir-se que, se a equação (3.33) for multiplicada por J e se na equação (3.34) se isolar o termo $J(q)\ddot{q}$ é, então, possível relacioná-las.

Logo, isolando o termo $J(q)\ddot{q}$:

$$J(q)\ddot{q} = \ddot{X} - \dot{J}(q, \dot{q})\dot{q} \quad (3.35)$$

e multiplicando (3.33) por J :

$$J\ddot{q} + JM^{-1}(q)C(q, \dot{q}) + JM^{-1}(q)g(q) = JM^{-1}(q)\tau \quad (3.36)$$

retira-se a relação entre elas:

$$\ddot{X} - \dot{J}\dot{q} + JM^{-1}(q)C(q, \dot{q}) + JM^{-1}(q)g(q) = JM^{-1}(q)\tau \quad (3.37)$$

Como:

$$\tau = J^T(q)F \quad (3.38)$$

a expressão (3.37) é equivalente a:

$$\ddot{X} - \dot{J}\dot{q} + JM^{-1}(q)C(q, \dot{q}) + JM^{-1}(q)g(q) = JM^{-1}(q)J^T F \quad (3.39)$$

Considerando que, se forem desprezados os atritos, a expressão genérica do modelo dinâmico no espaço da tarefa [6] é dada por:

$$\Lambda\ddot{X} + C_x(q, \dot{q}) + G_x(q) = F \quad (3.40)$$

então, comparando esta expressão com (3.39) observa-se que para poder obter F isolado é necessário multiplicar (3.39) pela inversa de $JM^{-1}(q)J^T$, resultado esse ilustrado de seguida. De forma a não alongar muito as expressões seguintes, q e \dot{q} foram omitidos das matrizes.

$$(JM^{-1}J^T)^{-1}\ddot{X} - (JM^{-1}J^T)^{-1}\dot{J}\dot{q} + (JM^{-1}J^T)^{-1}JM^{-1}C + (JM^{-1}J^T)^{-1}JM^{-1}g = F \quad (3.41)$$

Finalmente, relacionando (3.40) com (3.41) obtém-se a relação entre a dinâmica do espaço das juntas e da tarefa dada pelas seguintes expressões:

$$\Lambda = (JM^{-1}J^T)^{-1} \quad (3.42)$$

$$C_x = \Lambda JM^{-1}C - \Lambda J\dot{q} \quad (3.43)$$

$$G_x = \Lambda JM^{-1}g \quad (3.44)$$

Tal como o torque τ pode ser o resultado da contribuição de diferentes torques (3.29), também F é dado pelo soma de várias contribuições:

$$F = F_c + F_e \quad (3.45)$$

onde F_c é a força proveniente do comando e F_e é a força externa.

Nem sempre o Jacobiano é uma matriz quadrada, ou seja, nem sempre o número de juntas do manipulador é igual ao número de graus de liberdade do robô, o que torna complicado calcular a sua inversa. Assim, é comum neste casos recorrer à matriz inversa generalizada, $J^\#$, também chamada de pseudo inversa do Jacobiano. Para este trabalho, um pouco mais adiante, é usada a pseudo inversa dinamicamente consistente [23], que é obtida pelas relações entre os modelos dinâmicos e é dada por:

$$J^{\#T} = \Lambda JM^{-1} \Leftrightarrow J^\# = M^{-1}J^T(JM^{-1}J^T)^{-1} \quad (3.46)$$

Tendo agora conhecimento dos modelos dinâmicos do manipulador, é possível o desenvolvimento da arquitectura de controlo.

4 Controlo de Força

São cada vez mais os diferentes tipos de tarefas que se pretende que um robô execute. Assim, e de forma a responder às necessidades do robô para executar cada tarefa, têm sido desenvolvidos diversos tipos de controladores.

Para tarefas em que não existe qualquer tipo de interacção entre o manipulador e o ambiente que o rodeia, como por exemplo na pintura por spray, as estratégias de controlo de posição ou movimento têm sido aplicadas com sucesso. Mas, quando é necessário que o manipulador entre em contacto com o ambiente envolvente, como por exemplo em cirurgias roboticamente assistidas, este controlo não é o suficiente. Durante uma interacção, o ambiente define certas restrições que podem levar a que o *end-effector* se desvie da trajectória prevista, perdendo contacto com a superfície em que estava a interagir ou pressionando de forma demasiado forte a mesma. Neste caso, seria muito provável que o controlo de movimento falhasse pois, para tarefas que envolvem colisão, este controlo apenas tem sucesso quando a tarefa é detalhadamente planeada, o que exigiria um conhecimento preciso tanto do modelo do robô (cinemática e dinâmica), como do ambiente envolvente (geométrico e características mecânicas). O modelo do robô pode ser obtido com uma certa precisão, tal como pode ser observado em [3] mas uma descrição precisa do ambiente envolvente é muito difícil de obter.

Deste modo, torna-se crucial existir um controlo de interacção que permita que o *end-effector* possa contactar com o ambiente envolvente, de forma a concluir a tarefa com êxito. Os controladores de interacção podem ser divididos em controladores indirectos de força ou controladores directos de força. A diferença entre estes é que, no controlo indirecto de força, não existe uma realimentação em malha fechada da força e no controlador directo, existe, o que possibilita que neste se consiga controlar a força para um valor desejado.

O controlo executado neste trabalho é o de impedância, fazendo o mesmo parte dos controladores indirectos de forças.

4.1 Controlo de Impedância

De acordo com Hogan [14], a ideia do controlo de impedância é atribuir um determinado comportamento dinâmico ao robô quando existem interações externas de forma a que este se aproxime da dinâmica de um sistema massa-mola-amortecedor. O objectivo deste controlo não passa por controlar a força nem a posição mas sim a sua relação dinâmica ao longo de cada direcção no espaço da tarefa. Assim, obtém-se um método capaz de controlar o robô para diferentes interações com o meio envolvente, tais como, movimentos em espaço livre, interações com variados tipos de objectos (dos mais rígidos aos flexíveis) entre outras. No modo de funcionamento deste controlador já são considerados os tempos de resposta, acomodação e os efeitos das oscilações aquando de uma colisão. Assim o robô é capaz de estabelecer e perder contacto sempre de forma estável e controlada.

Como um robô com um controlador de impedância pode ser caracterizado como um sistema massa-mola-amortecedor, os parâmetros podem ser ajustáveis, o que permite melhorar a dinâmica de contacto entre o robô e os objectos.

De forma a obter o modelo do controlo de impedância, recorreu-se ao seguinte esquema:

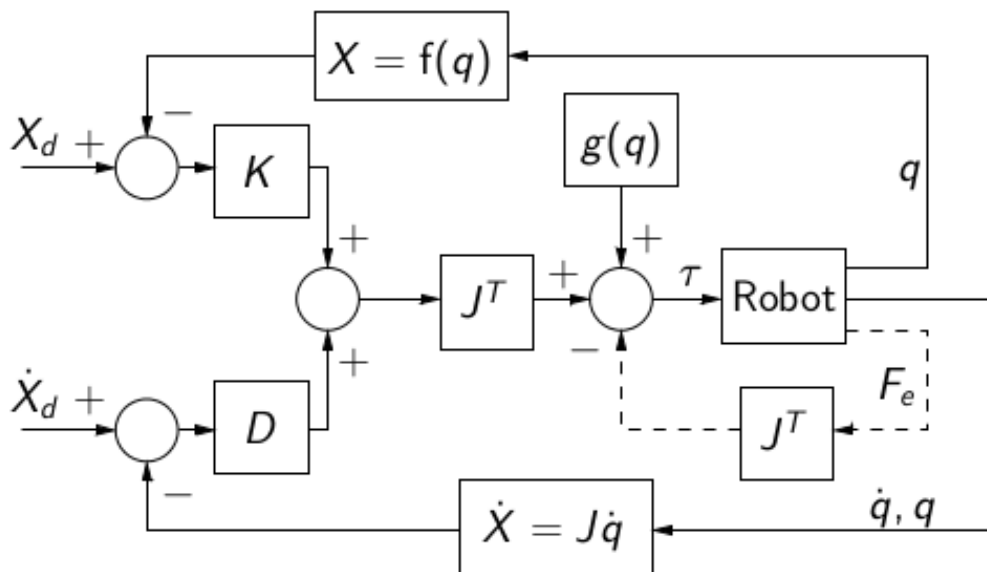


Figura 4.1: Esquema do controlo de impedância sem sensor de força retirado de [7]

A velocidade do *end-effector* \dot{X} e a força externa aplicada no robô F_e estão relacionadas entre si por uma impedância mecânica. No domínio de Laplace:

$$-F_e(s) = Z(s)\dot{X}(s) \quad (4.1)$$

com

$$sZ(s) = As^2 + Ds + K \quad (4.2)$$

onde A, K, e D são os parâmetros do sistema massa-mola-amortecedor, respectivamente.

A dinâmica do robô no espaço da tarefa (3.40), quando sujeita a forças de contacto externas, é dada por :

$$A\ddot{X} + C_x(q, \dot{q}) + G_x(q) = F_c - F_e \quad (4.3)$$

A dinâmica do robô que se pretende, corresponde à do sistema de segunda ordem do tipo massa-mola-amortecedor. Assim, partindo de (4.1) e (4.2), é possível chegar à expressão dessa dinâmica, que é dada por:

$$A(\ddot{X}_d - \ddot{X}) + D(\dot{X}_d - \dot{X}) + K(X_d - X) = F_e \quad (4.4)$$

onde A representa a matriz inércia, D a matriz de amortecimento desejado e K a matriz de rigidez desejada. Estas matrizes são definidas positivas, simétricas, constantes, reais e são especificadas pelo projectista. X_d é o vector que contém as componentes da posição desejada do *end-effector* e X o que contém as componentes da posição efectiva do robô. \ddot{X}_d \dot{X}_d são as acelerações e velocidades desejadas enquanto que \ddot{X} \dot{X} são os vectores das acelerações e velocidades efectivas do robô.

Sabendo que o robô deve seguir uma referência de aceleração, a equação (4.4) é reescrita sob a forma de:

$$\ddot{X} = \ddot{X}_d + A^{-1}(D(\dot{X}_d - \dot{X}) + K(X_d - X) - F_e) \quad (4.5)$$

Assim, sabendo a dinâmica do robô (4.3) e a impedância desejada (4.4), (4.5), é possível relacioná-las, obtendo, assim, a equação:

$$A(\ddot{X}_d + A^{-1}(D(\dot{X}_d - \dot{X}) + K(X_d - X) - F_e)) + C_x(q, \dot{q}) + G_x(q) + F_e = F_c \quad (4.6)$$

que, tendo em conta (3.38), pode ser reescrita para:

$$J^T[\Lambda(\ddot{X}_d + A^{-1}(D(\dot{X}_d - \dot{X}) + K(X_d - X) - F_e)) + C_x(q, \dot{q}) + G_x(q) + F_e] = \tau_c \quad (4.7)$$

Se a matriz:

$$A^{-1} = JM^{-1}J^T \quad (4.8)$$

Então, tendo em conta (3.42), (3.43), (3.44), (4.6) e, depois de feitas as devidas simplificações, o controlo de impedância tem apenas em conta os termos da mola e amortecedor, transformando-se, assim, num controlador PD (proporcional derivativo) onde:

$$F_c = K_P(X_d - X) + K_D(\dot{X}_d - \dot{X}) \quad (4.9)$$

onde

$$\dot{X}_d - \dot{X} = \frac{\delta}{\delta t}(X_d - X) \quad (4.10)$$

em que K_P e K_D são matrizes diagonais onde os valores da diagonal representam, respectivamente, a rigidez (ganho proporcional) e o amortecimento (ganho derivativo).

5 Técnicas de Estimação de Força

Tal como referido anteriormente, a possibilidade de estimar as forças envolvidas numa colisão durante o movimento do robô traz inúmeras vantagens. Com o intuito de avaliar se, efectivamente, é possível estimar as forças sem ter de recorrer a um sensor de força, foram analisadas duas possíveis técnicas, uma baseada no modelo dinâmico do robô (3.27) e outra no método dos resíduos proposto em [21].

5.1 Soluções adoptadas

5.1.1 Técnica baseada no modelo dinâmico

Sabendo que o modelo dinâmico no espaço das juntas é dado:

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + g(q) + F_v\dot{q} + F_s\text{sgn}(\dot{q}) = \tau \quad (5.1)$$

onde:

$$\tau = \tau_c + \tau_e + \tau_f \quad (5.2)$$

pode isolar-se o torque externo, que é induzido nas juntas por contacto do robô com o meio envolvente, obtendo assim:

$$\tau_e = M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + g(q) + F_v\dot{q} + F_s\text{sgn}(\dot{q}) - \tau_c \quad (5.3)$$

Finalmente, apenas é necessário transformar o torque em força sendo essa transformação dada por:

$$F = J^{\#T} \tau_e \quad (5.4)$$

onde $J^{\#T}$ é a pseudo-inversa dinamicamente consistente, observada em (3.46). Assim, é possível obter uma estimação da força envolvida na colisão.

5.1.2 Técnica baseada no método dos resíduos

Tendo como base o momento generalizado do robô:

$$p = M(q)\dot{q} \quad (5.5)$$

pode definir-se um sinal residual $r \in \mathbb{R}^n$ como:

$$r(t) = K_I \left[p(t) - \int_0^t (\tau + C^T(q, \dot{q})\dot{q} - g(q) + r) ds \right] \quad (5.6)$$

onde $r(0) = 0$, $p(0)=0$ e $K_I > 0$ é uma matriz diagonal de ganhos.

De notar que este modelo não tem em conta os efeitos do atrito pelo que, de forma a poder estudar esses efeitos, e tendo em consideração o modelo dinâmico (3.28), é possível adicionar ao estimador os parâmetros relativos às fricções viscosas e estáticas obtendo assim um novo sinal residual r , dado por:

$$r(t) = K_I \left[p(t) - \int_0^t (\tau + C^T(q, \dot{q})\dot{q} - g(q) - F_v\dot{q} - F_s \text{sgn}(\dot{q}) + r) ds \right] \quad (5.7)$$

Através da análise conjunta da dinâmica (3.28) e do momento generalizado do robô (5.5), é possível concluir que a dinâmica do resíduo , r , é dada por:

$$\dot{r} = K_I(\tau_{ext} - r) \quad (5.8)$$

onde cada componente r_i é independente e de primeira ordem, sendo uma versão filtrada de $\tau_{ext,i}$ onde, K_I funciona como um ganho do filtro. Nas condições ideais, esse ganho seria infinito, de onde resultaria:

$$r \simeq \tau_{ext} \quad (5.9)$$

Implementação

De forma a poder implementar a solução descrita em 5.1.2, a resolução foi feita discretamente, considerando 'h' como o período de amostragem.

Assim partindo de (5.7) tem-se que:

$$r(t) = K_I \left[p(t) - (\tau t + C^T(q, \dot{q})\dot{q}t - g(q)t - F_v\dot{q}t - F_s \text{sgn}(\dot{q})t + rt) \right] \quad (5.10)$$

onde $t = h$.

Como a matriz de Coriolis não foi obtida através da técnica dos *Christoffel symbols*, não foi possível utilizar directamente a transposta, sendo, então, necessário encontrar um método alternativo para poder implementar a solução. Assim, substituiu-se a matriz Coriolis por uma matriz genérica, 'A', e observou-se se a dinâmica do resíduo seria igual com esta alteração.

Partindo de (5.10) e (5.5) e derivando em ordem a t, tem-se que:

$$r(t) = K_I [\dot{M}(q)\dot{q} + M(q)\ddot{q} - (\tau + C^T(q, \dot{q})\dot{q} - g(q) - F_v\dot{q} - F_s \text{sgn}(\dot{q}) + r)] \quad (5.11)$$

Substituindo, então, $C^T(q, \dot{q})\dot{q}$ por A e após algumas simplificações tem-se que:

$$r(t) = K_I [\dot{M}(q)\dot{q} - A + M(q)\ddot{q} - \tau + g(q) + F_v\dot{q} + F_s \text{sgn}(\dot{q}) - r] \quad (5.12)$$

onde $\dot{M}(q)\dot{q} - A = C(q, \dot{q})\dot{q}$.

Por fim, relacionando a expressão (5.12) e a (3.28) e após algumas simplificações, pode observar-se que a dinâmica do resíduo se mantém inalterada pelo que este método alternativo é viável. Assim sendo, e com a devida adaptação dos ganhos, é possível obter o resultado visto em (5.9).

Com esta adaptação a expressão (5.10) sofre uma alteração passando agora a ser dada por:

$$r(t) = K_I [p(t) - (\tau t + \dot{M}(q)\dot{q}t - C(q, \dot{q})\dot{q}t - g(q)t - F_v\dot{q}t - F_s \text{sgn}(\dot{q})t + rt)] \quad (5.13)$$

Esta será a expressão usada ao longo deste trabalho para a estimação baseada no método dos resíduos.

Por fim, sabendo o resíduo, é necessário fazer novamente a transformação de torque para força (5.4), de modo a obter a força estimada.

6 Material e Validação Experimental

Neste capítulo são apresentados os materiais (robô real e simulador e phatom) usados para os testes e é feita a validação dos métodos de estimação usados.

6.1 Material

6.1.1 Robô Manipulador 7 DOF WAM

O robô usado neste trabalho foi um braço manipulador 7 DOF WAM da Barrett Technology [®]INC, mostrado na figura 6.1.

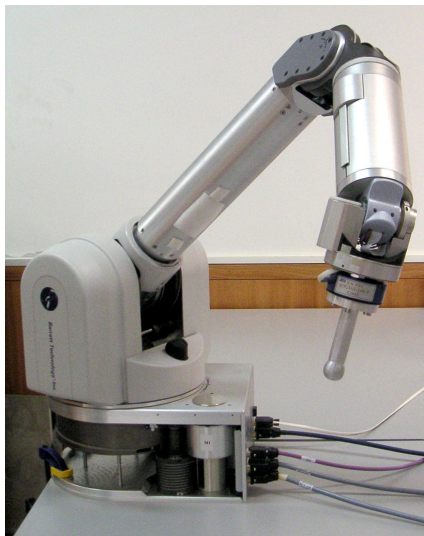


Figura 6.1: Manipulador 7-DOF WAM

Este robô tem sete juntas de revolução, o que leva a que tenha mais um grau de liberdade (DOF) do que o espaço cartesiano, que apenas tem 6, sendo, por isso, um robô redundante. Acresce ainda que devido à grande amplitude das suas juntas, torna-se um robô muito versátil.

Este manipulador é um robô leve, controlado por um computador, através de um Barramento de CAN, que opera usando o sistema operativo Linux, controlando o robô através

de uma aplicação de tempo real. A transmissão do torque entre os motores e as juntas é feita usando cabos, o que permite coeficientes de atrito muito baixos. No end-effector do manipulador foi acoplado um sensor de força JR3 para medir forças e binários nos seis graus de liberdade e um pequeno bastão usado para as tarefas de contacto. As informações para os modelos cinemático e dinâmico foram retiradas dos manuais do robô [35],[4].

6.1.2 Simulador e Phantom

Todos os testes realizados no robô real foram, primeiramente, realizados em ambiente virtual, usando, para isso, códigos anteriormente criados pelo grupo de investigação de robótica médica do Laboratório de Automação do Instituto de Sistemas e Robótica da Universidade de Coimbra. Os códigos usados foram o código do simulador e o do visualizador do Robô Manipulador (6.2).

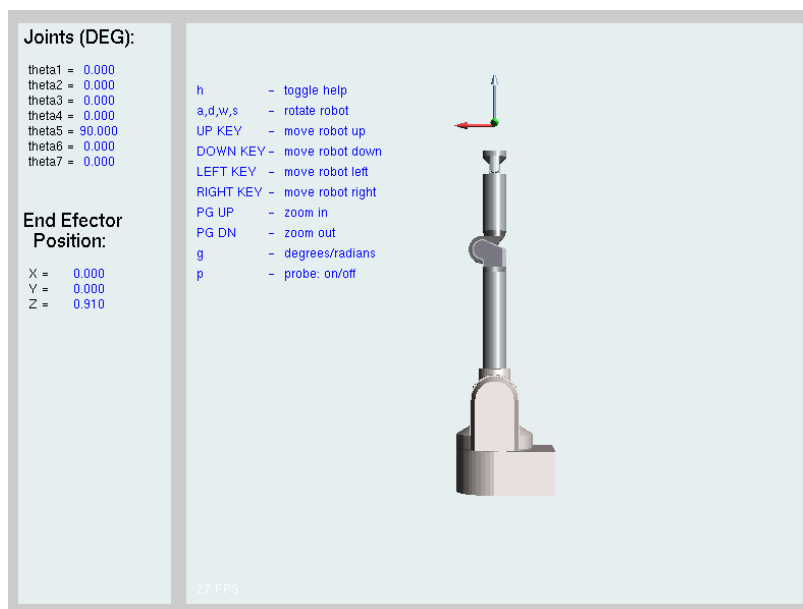


Figura 6.2: Janela do visualizador do Robô Manipulador

O simulador foi desenvolvido em linguagem de programação C/C++. Foram também criadas várias bibliotecas de software [9] que permitiram a realização dos cálculos da dinâmica e da cinemática bem como a comunicação entre o simulador e o visualizador.

Para poder manipular e criar trajectórias tanto no simulador do robô como no robô real foi utilizado um phantom desktop haptic device, figura 6.3, que está conectado a uma estação mestre. Esta envia as posições cartesianas do phantom para uma estação escrava e recebe o feedback de força do phantom. Na estação escrava são calculados todos os algoritmos e é

feita a comunicação com o robô e o sensor de força.



Figura 6.3: Phantom Desktop haptic device

6.2 Validação Experimental

De forma a verificar se os métodos usados para a estimação de força [5] funcionavam correctamente, através do MATLAB, no ambiente de simulação *Simulink*, foi criado um robô planar de 2 elos e foram calculadas as suas matrizes de Inércia, Gravidade e Coriolis. A este robô foram, então, aplicados torques externos e, usando os métodos de estimação, obtidos esse mesmo torques. Assim, sabendo à partida quais são os torques que estão a ser aplicados, e estando a trabalhar num ambiente de simulação puro onde não há influências externas, facilmente se pode concluir se o método está a estimar de forma correcta ou não.

De notar que o objectivo final deste trabalho é estimar as forças mas, como originalmente os métodos de estimação permitem obter os torques, sendo as forças posteriormente obtidas em função desses mesmos torques através da relação (5.4), nesta secção serão usados os torques estimados pois, como são conhecidos à partida, torna-se mais simples proceder a comparações.

Para a validação da técnica (5.1.1) foi criado o seguinte Diagrama Simulink:

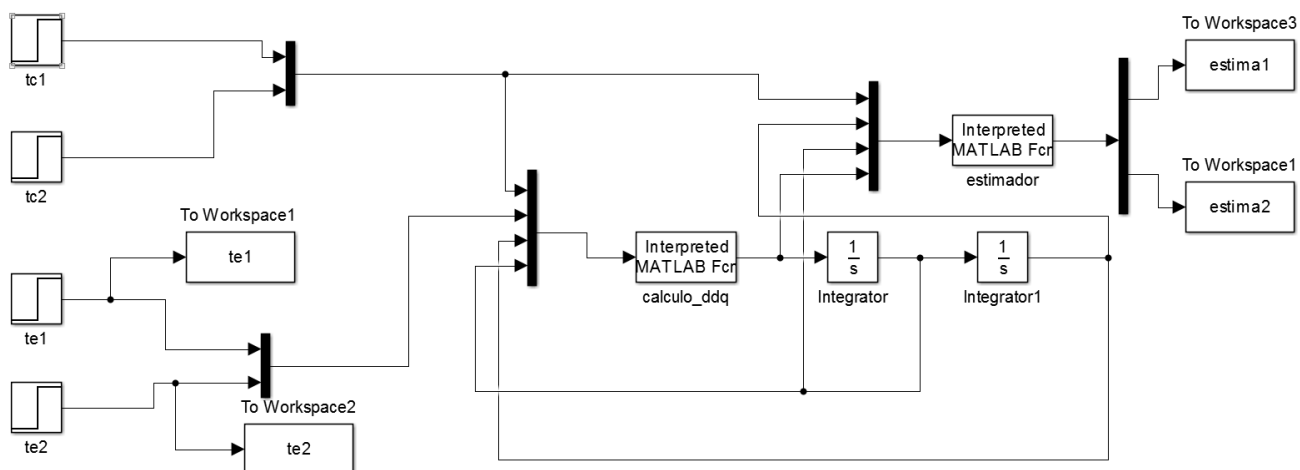


Figura 6.4: Diagrama Simulink utilizando a estimação baseada no modelo dinâmico

Este diagrama recorre ao uso de dois blocos Interpreted Matlab Fcn nos quais o bloco denominado *calcula_ddq* contém uma função que recebe como parâmetros de entrada os torques de controlo, os torques externos e as posições e velocidades das juntas e retorna a aceleração das juntas. Já o bloco denominado *estimador*, contém a função que vai estimar os torques externos, recebendo como parâmetros de entrada os torques de controlo e as acelerações, velocidades e posições das juntas.

Para todos os diagramas que irão ser apresentados de seguida, os torques externos foram inseridos recorrendo ao uso do bloco Step sendo que, ao 6^o segundo de simulação, foi inserido um torque de 1 Newton para o elo 1 e um torque de 2 Newtons para o elo 2. Estes torques, bem como o resultado da sua estimação, podem ser observado na figura seguinte:

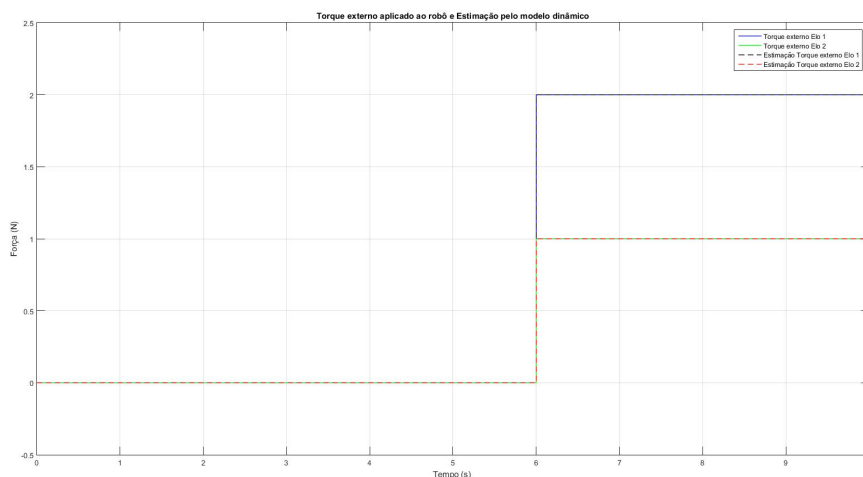


Figura 6.5: Torques externos aplicados e sua estimação, usando a técnica (5.1.1).

Como é de fácil visualização, os torques externos aplicados ao robô e a sua estimação sobrepõem-se, o que permite concluir que a estimação é óptima, levando a que a técnica usada seja válida. No entanto, para esta estimação, são usadas as acelerações das juntas, que, normalmente, são muito ruidosas e que, apesar de em ambiente simulado não terem grande influência, quando utilizadas nas estimações no robô real, irão tornar-se um problema, como poderá ser observado no capítulo seguinte.

De forma a validar a técnica (5.1.2), foram criados dois diagramas Simulink. O primeiro diagrama tem como objectivo estimar os torques usando a equação (5.7) e pode ser observado na figura 6.6.

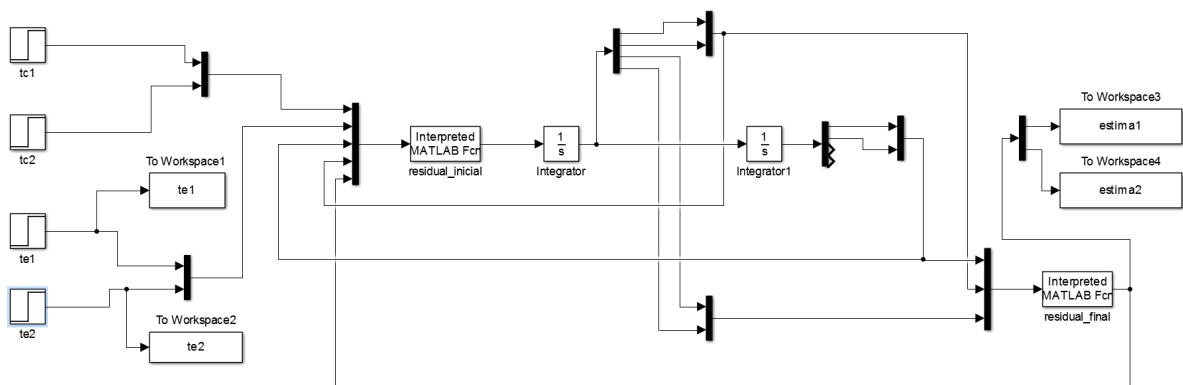


Figura 6.6: Diagrama Simulink utilizando a estimação baseada na expressão (5.7).

Neste diagrama, a estimação dos torques é obtida em duas fases, através do recurso a duas funções que se complementam. O bloco denominado *residual_inicial* contém uma função que, após receber como parâmetros de entrada os torques de controlo, os torques externos a velocidade e posição das juntas e o resíduo calculado na iteração anterior, calcula e retorna as acelerações nas juntas, bem como o resultado da expressão:

$$\tau + C^T(q, \dot{q})\dot{q} - g(q) - F_v\dot{q} - F_s\text{sgn}(\dot{q}) + r \quad (6.1)$$

para que este possa ser integrado recorrendo ao bloco Integrator do MATLAB.

Numa segunda fase, através da função contida no bloco denominado *residual_final*, que recebe como parâmetros de entrada a posição e velocidades das juntas e o resultado do integral, é calculada a parte restante da equação (5.7), obtendo, assim, a estimação dos torques, que pode ser visualizada na figura seguinte:

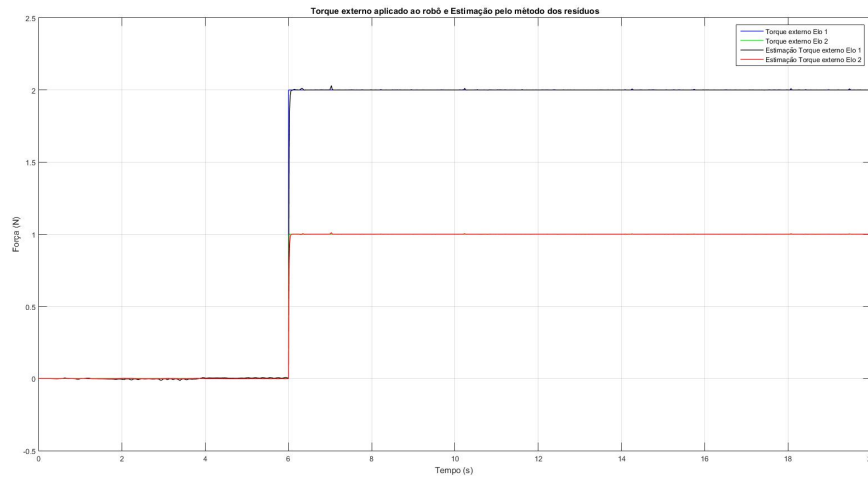


Figura 6.7: Gráfico dos torques externos aplicados e da sua estimação usando a equação (5.7) e um ganho de filtro de 100.

Neste gráfico, é possível concluir que a estimação dos torques se aproxima muito daqueles aplicados ao robô, apesar de existirem pequenas discrepâncias. Assim, é possível concluir que a técnica utilizada é válida. Mas, apesar de esta ser válida, não pode ser aplicada directamente ao simulador do robô, devido a não poder ser possível calcular o integral directamente. Assim, foi necessário encontrar um método alternativo para poder usá-la, método esse que tem como base o uso da equação (5.13). Com base neste método, foi criado um segundo diagrama Simulink:

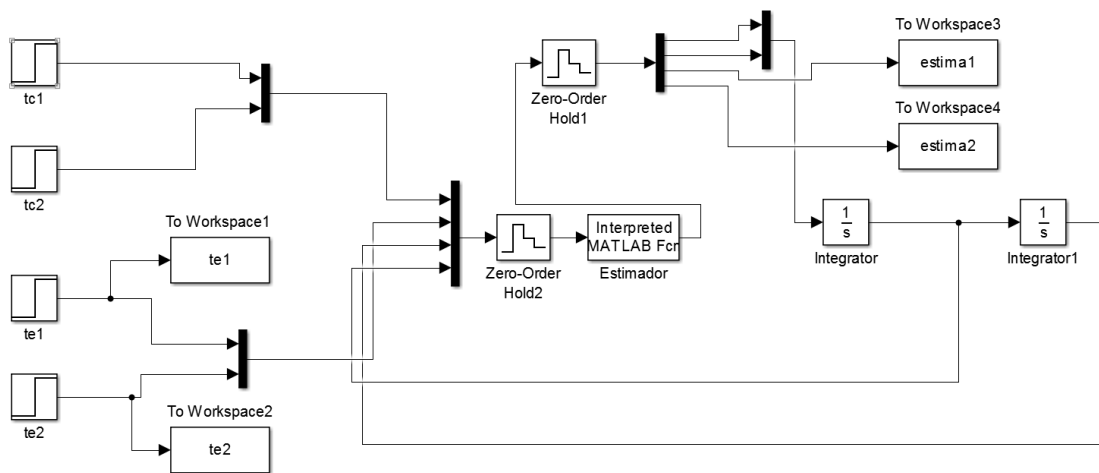


Figura 6.8: Diagrama Simulink utilizando a estimação baseada na equação (5.13)

Como o cálculo do método de estimação é feito discretamente, foi necessário recorrer ao uso dos blocos Zero-Order-Hold presentes no MATLAB para discretizar a função presente no bloco denominado *estimator*. Esta função recebe como parâmetros de entrada os torques

de controlo, os torques externos a velocidade e a posição das juntas e retorna as acelerações das juntas, bem como a estimação dos torques externos. Essa estimação pode ser vista na figura seguinte:

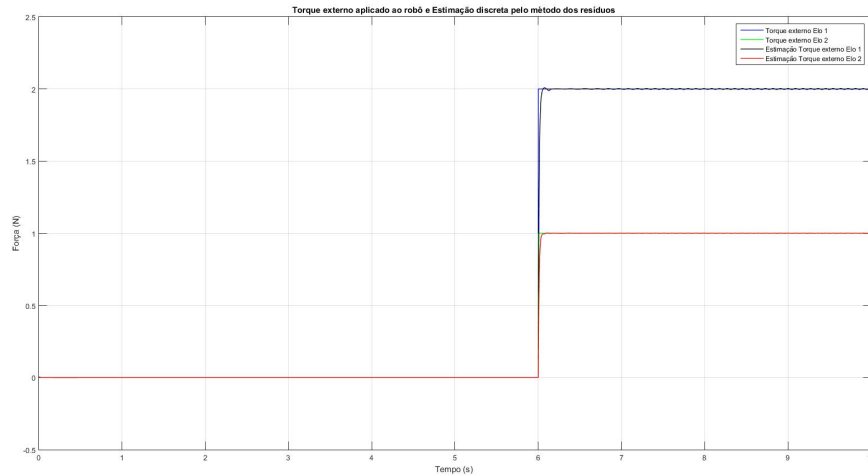


Figura 6.9: Gráfico dos torques externos aplicados e da sua estimação usando a equação (5.13) e um ganho de filtro de 100.

Mais uma vez, é possível observar que a referência e a estimação são muito próximas, pelo que este método alternativo é viável.

De notar que, neste capítulo, apenas está ser analisada a validade da técnica, pelo que as análises às discrepâncias e à resposta da estimação são feitas no capítulo seguinte, quando estas técnicas forem aplicadas ao simulador do robô e ao próprio robô.

7 Análise de resultados

Neste capítulo, as técnicas de estimação são aplicadas ao simulador do robô e ao robô real e o seu desempenho é comparado, inicialmente, com as forças provenientes de uma parede virtual e, posteriormente, com as forças obtidas através do sensor de força.

7.1 Ambiente de Simulação

7.1.1 Estimação da força para trajectórias em x, y e z

Para verificar se os métodos de estimação funcionam correctamente em todo o espaço cartesiano, foram colocadas paredes virtuais nos três eixos coordenados e, com o auxílio do phantom, geradas trajectórias onde houvesse um contacto directo do robô com essas paredes. As forças geradas durante essa colisão são obtidas através do deslocamento de posição entre a parede virtual e o robô, multiplicado pela rigidez da parede. Estas forças da parede virtual irão ser usadas como referência ao longo desta secção.

O gráfico das forças envolvidas durante o contacto do robô com uma parede virtual colocada no eixo coordenado x é apresentado de seguida:

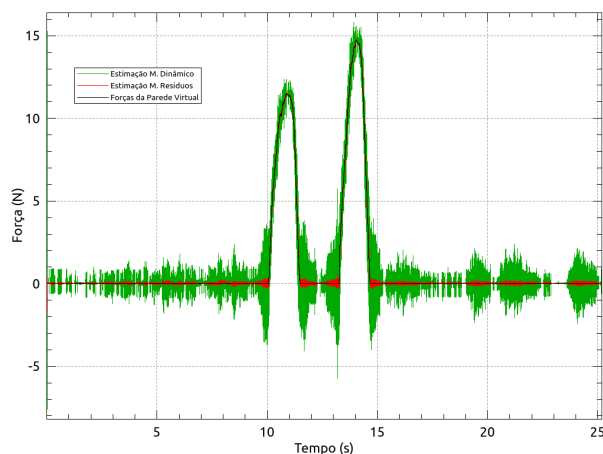
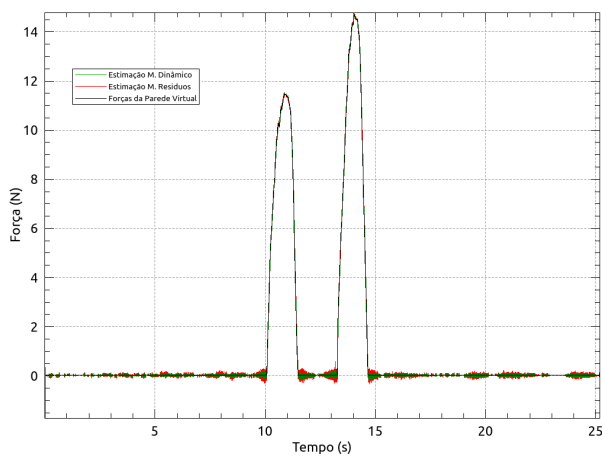


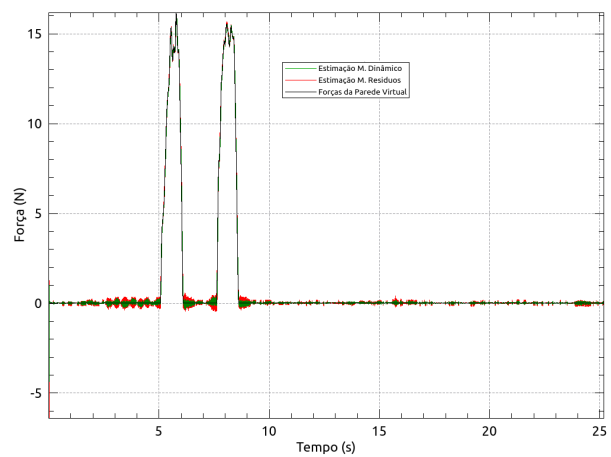
Figura 7.1: Força gerada numa colisão com uma parede virtual no eixo x e respectivas estimações

Neste gráfico, é possível observar as forças exercidas pela parede virtual (a preto) bem como a sua estimação usando a técnica baseada no modelo dinâmico (5.1.1) (a verde) e usando a técnica baseada no método dos resíduos (5.1.2) (a vermelho). Rapidamente se conclui que a estimação usando a técnica baseada no modelo dinâmico não é viável. Isto deve-se ao facto de esta técnica usar as acelerações das juntas para fazer a estimação, acelerações essas que são muito ruidosas e perturbam o desempenho da estimação. De forma a tentar combater este problema, a estimação foi filtrada através de um filtro passa-baixo, obtendo o resultado visível na figura 7.2a.

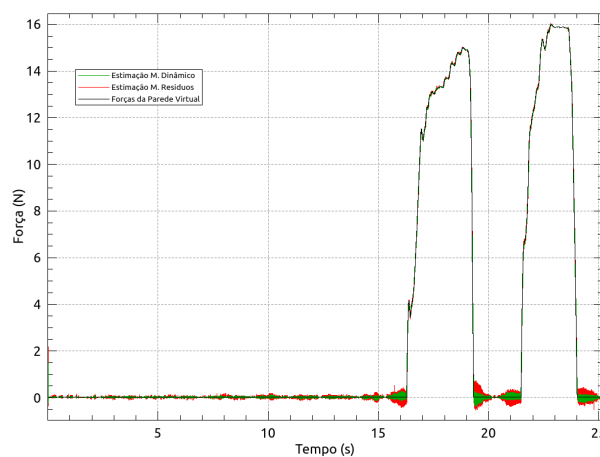
Nas figuras seguintes, é possível observar os gráficos das forças geradas durante o contacto do robô com paredes virtuais colocadas nos eixos x y z, assim como as estimações dessas forças nas quais o método baseado no modelo dinâmico do robô já se encontra filtrado.



(a) Parede Virtual em x



(b) Parede Virtual em y



(c) Parede Virtual em z

Figura 7.2: Forças geradas durante o contacto do robô com paredes virtuais colocadas em x y z e respectivas estimações

Para a obtenção dos gráficos acima visualizados, utilizou-se o phantom e criou-se uma trajectória na qual o robô, inicialmente, entrou em contacto com a parede virtual em y , depois entrou em contacto com a parede virtual colocada em x e, finalmente, com a parede virtual colocada em z . Todos estes contactos foram efectuados duas vezes consecutivas.

No início de cada simulação, ambas as técnicas estão a estimar certos valores de força, quando o desejável seria que estimassem zero, visto que não existe qualquer interacção entre o robô e a parede. Este erro surge no início das simulações pois é nesse instante que o phantom é activado e essa activação leva a que seja introduzido ruído no sistema, que irá perturbar o desempenho da estimação.

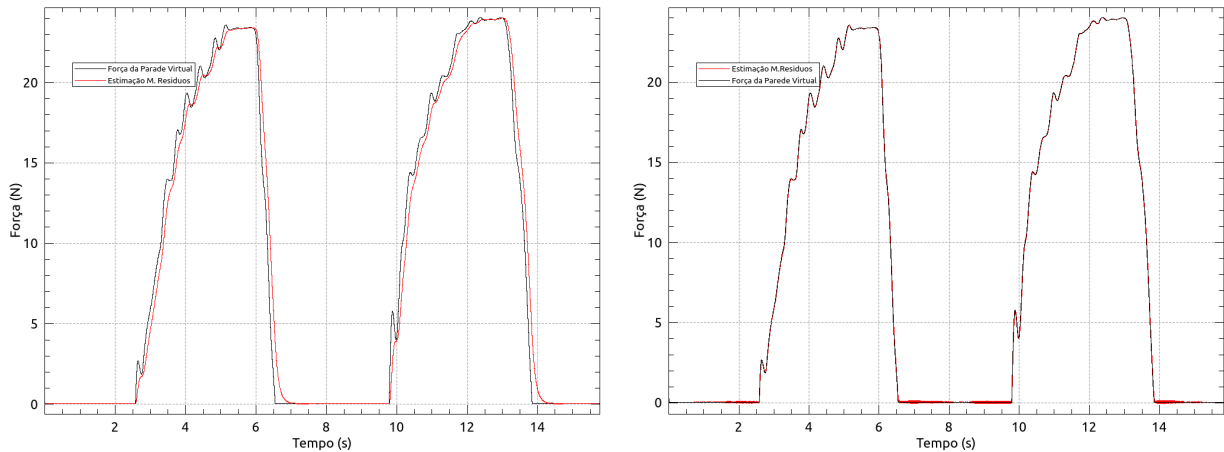
Com a implementação do filtro passa-baixo na técnica baseada no modelo dinâmico e utilizando uma frequência de corte baixa, foi possível diminuir substancialmente o ruído, obtendo uma estimação próxima da referência para todos os casos analisados. No entanto, utilizar as acelerações das juntas para a estimação não é viável pois, apesar de em ambiente de simulação, ter sido possível diminuir o ruído, nos testes com o robô real, estas irão tornar-se um problema, como poderá ser observado na subsecção seguinte. Desta forma, esta técnica não será mais analisada ao longo desta secção.

Quanto a técnica baseada no método dos resíduos, observa-se que a estimação também se aproxima muito da referência em todos os casos considerados, apesar de também conter algum ruído. No entanto, este não é gerado pela aceleração das juntas já que este método apenas usa para a estimação as medidas das posições das juntas. Assim, pode tentar-se diminuir o ruído pois, como este método faz uso de um ganho K_I , que funciona como um ganho de um filtro passa-baixo, ajustes neste ganho podem levar à sua diminuição.

De notar que as estimações funcionaram da mesma forma qualquer que fosse o eixo coordenado considerado e, assim, de forma a não sobrecarregar o presente estudo com gráficos, daqui em diante todos os estudos efectuados serão realizados no eixo coordenado z .

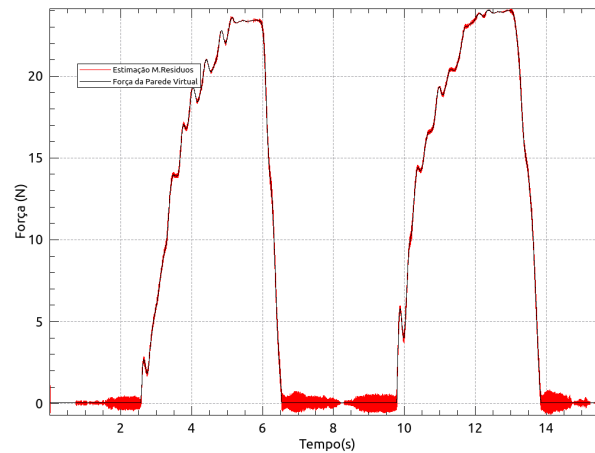
7.1.2 Análise do efeito do ganho K_I na estimação

Para efectuar o estudo do efeito do ganho K_I na estimação, foram considerados 3 ganhos diferentes com os valores de 10, 100 e 500. De forma a poder comparar os gráficos, foi garantido que o robô executava sempre a mesma trajetória, contactando com a parede virtual sempre da mesma maneira. Os resultados podem ser observados nos gráficos seguintes:



(a) $K_I = 10$

(b) $K_I = 100$



(c) $K_I = 500$

Figura 7.3: Estimação usando o método dos resíduos para diferentes valores de K_I

Para cada um destes gráficos, foi calculado o erro de estimação e efectuado o tratamento estatístico, obtendo os resultados apresentados na tabela seguinte:

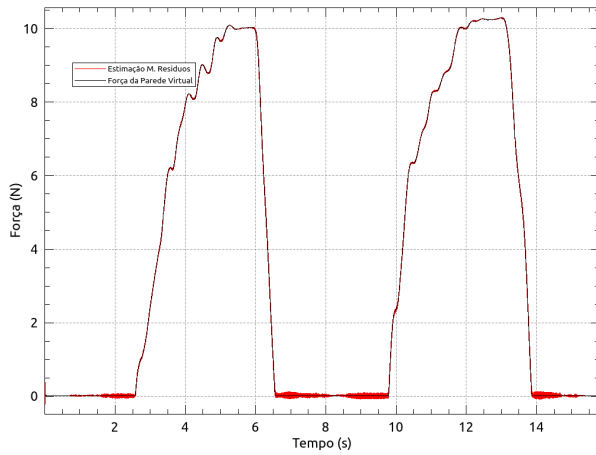
	$K_I=10$	$K_I=100$	$K_I=500$
avg (N)	0.5978	0.075	0.152
var (N^2)	1.397	0.017	0.0494
$ \text{Max} $ (N)	4.957	0.833	1.059

Tabela 7.1: Análise dos erros de estimação (média (avg), variância (var), módulo do valor máximo ($||\text{Max}||$)) para diferentes valores de K_I

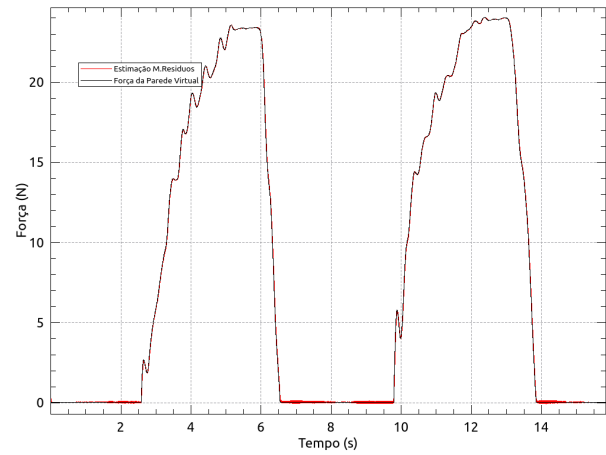
Pela análise dos gráficos e da tabela 7.1, são várias as conclusões que se podem retirar. Desde de logo, observa-se que, para um ganho pequeno, $K_I = 10$, o ruído é praticamente nulo. No entanto, apesar de o ruído ser muito pequeno o método tem uma resposta lenta, demorando a detectar quando o robô contacta com a parede e quando deixa de o fazer, não conseguindo acompanhar as pequenas variações de força, levando a que, o erro e a variância, tenham valores tão elevados. Já o uso de um ganho elevado, $K_I = 500$, resolve o problema da resposta do estimador, melhorando em muito o erro, mas, em contrapartida, não elimina tão bem o ruído. Com um ganho intermédio como $K_I = 100$ é possível obter uma boa estimação e um ruído aceitável, sendo, com este ganho, obtidos os melhores valores dos erros de estimação com uma média e uma variância perto de zero.

7.1.3 Análise do efeito da rigidez da parede virtual na estimação

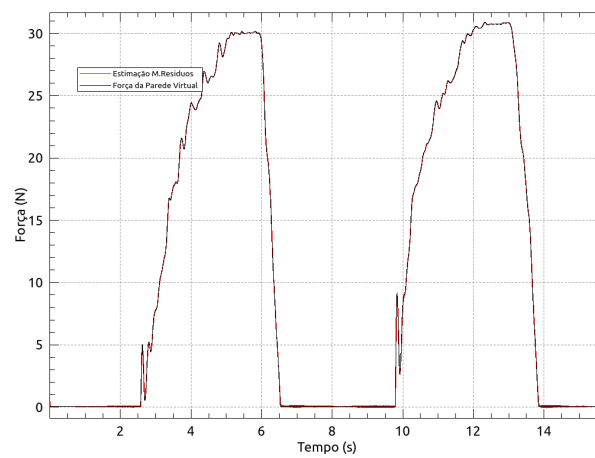
De forma a estudar o desempenho do estimador em contacto, foram consideradas três tipos de parede virtual. Uma mais mole, com uma rigidez de 200, outra um pouco mais rígida, com uma rigidez de 1000 e, por fim, uma muito rígida, com uma rigidez de 3000. Para estes testes foi usado um $K_I = 100$. Os resultados da estimação e análise estatística do erro podem ser observados nos gráficos seguintes e na tabela seguinte, respectivamente:



(a) Rigidez = 200



(b) Rigidez = 1000



(c) Rigidez = 3000

Figura 7.4: Estimação usando o método dos resíduos para diferentes valores de rigidez da Parede Virtual

Observa-se, facilmente, que o estimador tem um bom desempenho qualquer que seja a rigidez da parede virtual, conseguindo estimar contactos onde a força é menor, 7.4a, e onde a força é maior, 7.4c. Este resultado é suportado pelos dados da tabela 7.2, onde, as médias e variâncias são muito próximas entre si. Assim se pode concluir que a rigidez da parede virtual não tem qualquer influência no desempenho do estimador.

	Rigidez=200	Rigidez=1000	Rigidez=3000
avg (N)	0.0392	0.075	0.101
var (N^2)	0.004	0.017	0.040
Max (N)	0.372	0.833	2.106

Tabela 7.2: Análise dos erros de estimação (média (avg), variância (var), módulo do valor máximo (||Max||))para diferentes valores de rigidez das paredes

7.2 Robô Real

7.2.1 Análise do desempenho dos estimadores usando Paredes Virtuais

De forma a poder analisar o desempenho dos estimador nos testes usando o robô real, foi implementada a mesma trajectória usada nos testes em ambiente de simulação. Foi, também, colocada uma parede virtual no eixo coordenado z. Assim, é possível fazer comparações entre as estimações obtidas tanto com o robô real, como com o simulador do robô.

O gráfico seguinte mostra as forças geradas durante o contacto do robô real com uma parede virtual, assim como as suas estimações. Devido ao elevado ruído verificado, ambos os métodos foram filtrados.

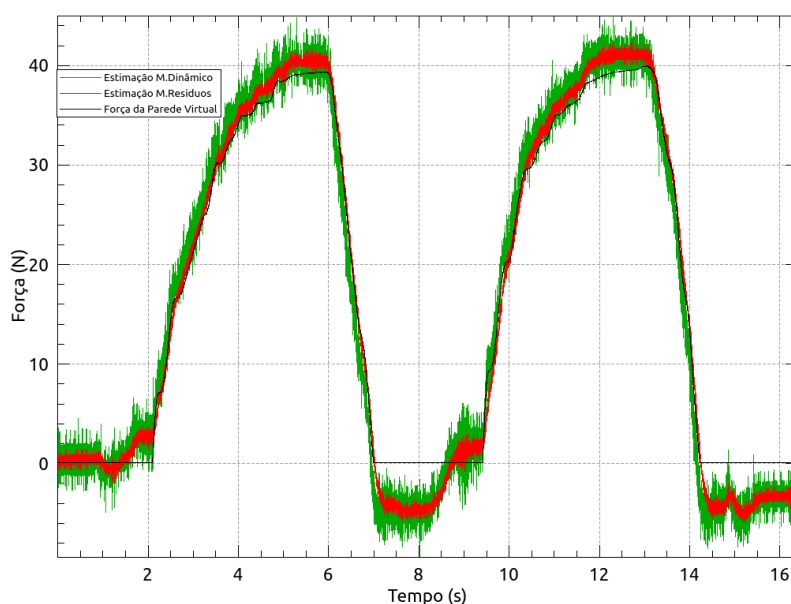


Figura 7.5: Força gerada numa colisão com uma parede virtual no eixo z e respectivas estimações

Mesmo com a aplicação de um filtro com uma frequência de corte reduzido, 10 Hz, a estimação baseada no modelo dinâmico é muito ruidosa, tendo um desempenho pior do que a estimação baseada no método dos resíduos. Tal como referido anteriormente, este problema deve-se ao facto de o estimador usar a aceleração das juntas para o cálculo da estimação das forças e como essas acelerações muito ruidosas inviabilizam este método.

Na figura seguinte, é apresentado o mesmo gráfico mas omitindo a estimação baseada no modelo dinâmico, de forma a poder ser mais intuitiva a análise da estimação baseada no método dos resíduos.

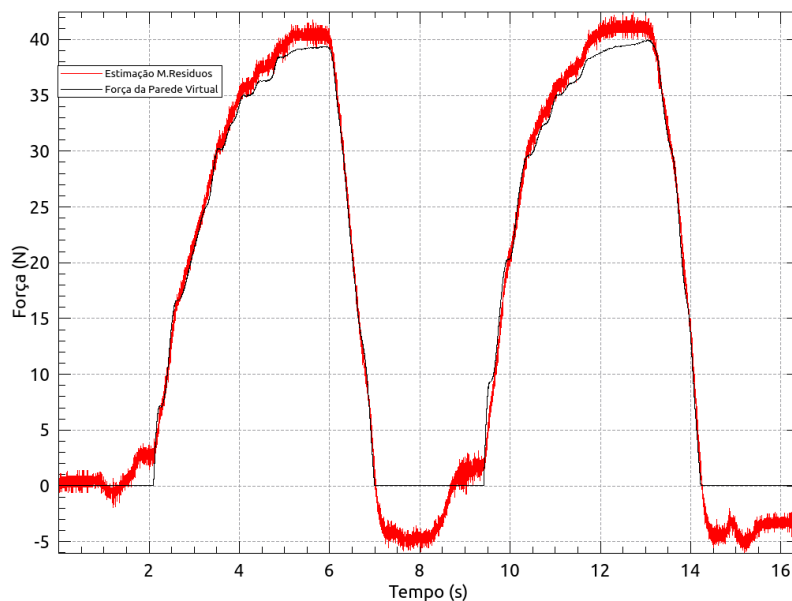


Figura 7.6: Força gerada numa colisão com uma parede virtual no eixo z e estimação usando o método dos resíduos

Analisando agora a estimação baseada no método dos resíduos, é possível observar dois desempenhos distintos. Enquanto o robô se encontra a fazer força contra a parede virtual o estimador é capaz de acompanhar a evolução da força, estimando-a de forma correcta. Quando o robô deixa de fazer força, e quando se encontra em espaço livre, isto é sem estar em contacto com nada, o estimador tem um mau desempenho. Isto é mais intuitivo em espaço livre, visto não estar em contacto com nada, não estar a exercer qualquer tipo de força e, sendo assim, o estimador deveria estimar zero.

Este gráfico pode ser comparado com o obtido em 7.3a, visto que o único elemento que difere entre os dois é que num foi utilizado o robô real e no outro foi utilizado o simulador do robô. Comparando, então, os gráficos, conclui-se que a maior diferença entre ambos é, efectivamente, o problema da estimação em espaço livre que, tal como em 7.3b, deveria ser zero.

Este problema deve-se ao facto de não ser possível compensar as forças de atrito quando se está a usar o robô real, pois estas são desconhecidas, ou seja, durante o cálculo da estimação (5.13), os termos $F_v\dot{q}$ e $F_s\text{sgn}(\dot{q})$ não são considerados.

7.2.2 Análise do efeito das forças de atrito na estimação

Para estudar o efeito das forças de atrito na estimação, voltaram a ser efectuados testes no simulador do robô, devido ao facto de as matrizes das fricções serem conhecidas e poderem ser alteradas. Assim, para as mesmas condições em que foi gerado o gráfico 7.3a, foi obtido o gráfico seguinte, com a diferença que, para o cálculo da estimação, não foram tido em conta os termos do atrito viscoso e estático.

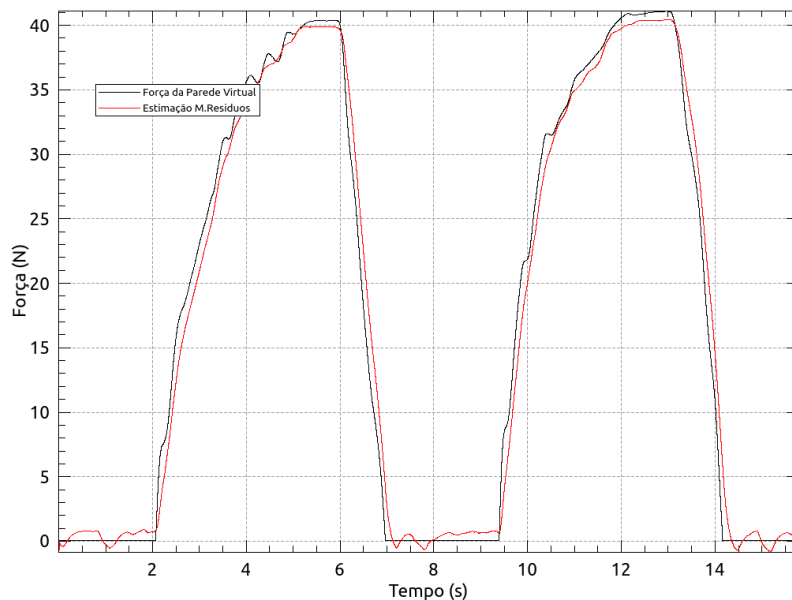


Figura 7.7: Estimação usando o método dos resíduos sem ter em conta as forças de atrito

Comparando os dois gráficos, conclui-se que o desconhecimento das fricções de atrito do robô constitui um problema para a estimação pois, tal como em 7.3a, o estimador não deveria estimar forças em espaço livre, o que não aconteceu em 7.7 onde se observa que a estimação em espaço livre não é zero, tendo o estimador obtido forças quando estas não existiam.

Através da análise da equação (5.13), é possível concluir que o efeito do atrito viscoso na estimação depende directamente da velocidade do robô. Como a velocidade ao longo da trajectória efectuada foi reduzida, o efeito do atrito viscoso não é substancial, podendo, assim, concluir-se que as discrepâncias entre a estimação e a referência se devem, na sua maioria, à contribuição do atrito estático.

Esta conclusão torna-se mais óbvia através da análise do gráfico seguinte que foi obtido

nas mesmas condições do anterior, com a diferença que, desta vez, foram tidas em conta na estimação as fricções viscosas.

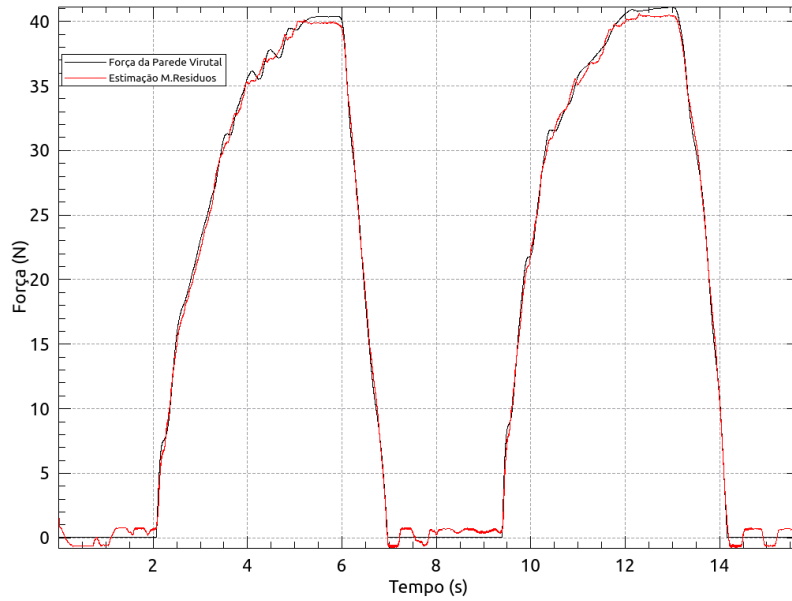


Figura 7.8: Estimação usando o método dos resíduos tendo em conta as fricções viscosas

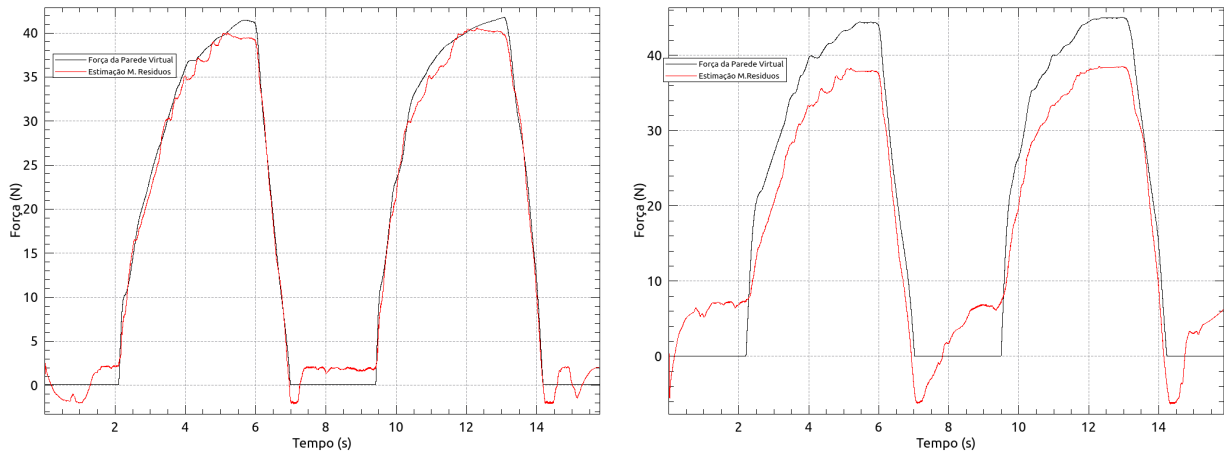
Comparando este gráfico com o da figura 7.7, mais especificamente, comparando as estimações em espaço livre de ambos, pode observar-se que são muito semelhantes. Assim, verifica-se o que foi anteriormente referido sobre a influência das fricções estáticas na estimação.

Para perceber melhor esta influência, foi efectuado um estudo no qual, mantendo o atrito viscoso compensado, foi-se aumentando gradualmente os valores do atrito estático e observado o seu impacto na estimação. Assim, as fricções usadas para a obtenção do gráfico 7.8 foram usadas como base e multiplicadas por 3 e por 10, obtendo-se os resultados seguintes:

	Fricções iniciais	3 vezes mais Fricções	10 vezes mais fricções
avg (N)	0.518	1.314	5.479
var (N^2)	0.315	2.047	27.353
Max (N)	1.649	2.868	7.657

Tabela 7.3: Análise dos erros de estimação (média (avg), variância (var), módulo do valor máximo (||Max||))para diferentes valores de fricções estáticas

Tendo em conta os 3 gráficos anteriores e analisando os resultados estatísticos da tabela 7.3, pode concluir-se que o aumento das fricções estáticas provoca um aumento nos erros



(a) Triplo das fricções estáticas

(b) 10 vezes as fricções estáticas

Figura 7.9: Estimação pelo o método dos resíduos para diferentes valores de fricções estáticas

de estimação. Apesar de este erro ser mais visível em espaço livre, quando o aumento das fricções é significativo, 7.9b, a estimação também não consegue ter um bom desempenho nas tarefas de contacto.

Assim, conclui-se que, para ter uma estimação com elevado desempenho, torna-se crucial saber quais as fricções do robô, de forma a poder incluí-las no processo de estimação.

7.2.3 Comparação das forças estimadas com as obtidas pelo sensor de Força

Finalmente, foi conectado ao end-effector um sensor de força desenvolvido pela empresa JR3 e, com o auxílio do phantom, o robô foi guiado de forma a entrar em contacto com uma superfície mais mole, uma esponja, e uma superfície mais rígida, um livro de capa dura. As forças obtidas directamente através do sensor de força e a sua estimação podem ser observadas na figura seguinte.

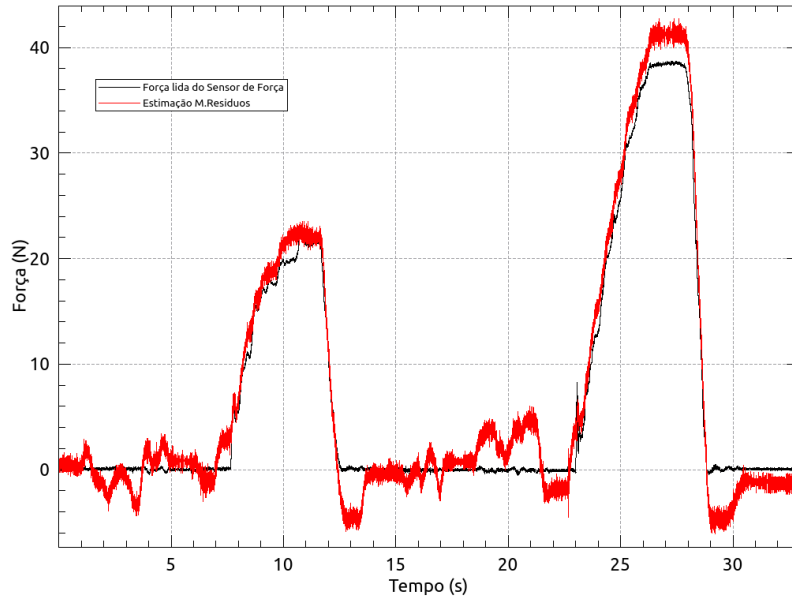


Figura 7.10: Força obtida usando o sensor de força e respectiva estimacão

O tratamento estatístico do erro de estimacão pode ser observado na tabela seguinte:

	Sensor de força
avg (N)	1.766
var	4.605
Max (N)	6.494

Tabela 7.4: Análise do erro de estimacão (média (avg), variância (var), módulo do valor máximo (||Max||)) usando o sensor de força

Tal como seria de esperar, como as fricções do robo não são conhecidas, não sendo, por isso, tidas em conta no momento da estimacão, o estimador apresenta um mau desempenho, visível de forma mais evidente em espaço livre. Durante o contacto, primeiro com a esponja e, depois, com o livro de capa dura, a qualidade da estimacão aumenta apesar de ainda apresentar algumas diferenças em relação as forças obtidas pelo sensor.

analisando a tabela 7.4  possível observar-se que, em média, o erro da estimacão ronda os 2 Newtons de força, pelo que podem tirar-se de imediato certas conclusões.

Para tarefas que não exijam uma precisão exacta da força efectuada, como na tele-ecografia, onde ter mais 2 Newtons não é muito significativo, este método é viável podendo substituir o sensor de força, trazendo, assim, todas as vantagens já mencionadas ao longo deste trabalho.

Para tarefas, onde saber a força exacta que se está a exercer é crucial, em cirurgias

minimamente invasivas, por exemplo, este método já não é recomendável, pois só um ligeiro aumento da força pode ser muito problemático. No entanto, no futuro, se for possível saber quais os parâmetros das fricções do robô, de forma a poder incorporá-los na estimação, o método dos resíduos poderá ser um substituto fiável para o sensor de força.

8 Conclusão

Com o desenvolvimento deste trabalho, cujo foco era estudar a possibilidade de estimar as forças sem recorrer a um sensor de força, foram alcançadas descobertas muito interessantes.

Através da análise das simulações usando o método baseado no modelo dinâmico, foi possível concluir que a utilização das acelerações das juntas para o processo de estimação é problemático, devido ao facto de estas serem muito ruidosas. Apesar de, em ambiente simulado, este problema ser atenuado com o recurso a um filtro, quando os testes são feitos utilizando o robô real e, mesmo estando o método a ser filtrado, a estimação é muito ruidosa e tem um desempenho pior do que a estimação baseada no método dos resíduos. Assim, é possível concluir que o estimador baseado no modelo dinâmico não apresenta as qualidades necessárias para substituir o sensor de força.

Por outro lado, os resultados obtidos usando o estimador baseado no método dos resíduos foram muito promissores. Nos testes realizados em ambiente de simulação, ou seja, usando o simulador do robô, foram obtidas estimações muito próximas das forças da parede virtual. Desde contactos com paredes virtuais mais moles até às mais rígidas, o estimador provou ter a capacidade de manter um bom desempenho, qualquer que fosse a rigidez da parede. Provou-se, ainda, ser uma mais valia, o facto de neste estimador já estar incorporado um ganho que funciona como um ganho de um filtro passa-baixo, levando, assim, a que não seja necessário recorrer a filtros externos. Este ganho, pode, ainda, ser ajustável pelo projectista dependendo se este pretende uma estimação com pouco ruído (ganho mais baixos), ou se pretende que o estimador tenha uma resposta mais rápida a contactos (ganhos mais elevados). Desta forma, a escolha deste ganho torna-se muito importante.

Quanto aos testes realizados com o robô real e com a utilização do estimador baseado no método dos resíduos, foram encontradas alguns problemas na estimação. Desde logo, o facto de o estimador obter forças quando não existia qualquer contacto entre o robô e parede, facto este que se devia ao estimador utilizar durante a estimação as fricções de atrito (estático e viscoso) e, como estas não são conhecidas quando o robô real é utilizado, o estimador não

as consegue compensar.

Finalmente, e depois de comparada a estimação da força obtida pelo método dos resíduos com a força obtida pelo sensor de força, foi possível concluir que este estimador é um forte candidato a poder substituir o sensor de força, se se conseguir descobrir as fricções do robô. Até lá, como o erro obtido entre a estimação e os valores do sensor de força é pequeno, na ordem dos 2 Newtons, o estimador pode substituir o sensor para tarefas nas quais não seja necessário um conhecimento exacto da força.

8.1 Trabalho Futuro

Como ficou claro ao longo deste trabalho, o conhecimento exacto do modelo dinâmico do robô é muito importante para que a estimação seja a melhor possível. Desta forma, torna-se crucial conseguir arranjar uma forma de saber quais as fricções do robô, para que estas possam ser consideradas no momento da estimação. Assim, como trabalho futuro, é proposto encontrar um método que permita obter conhecimento de todas as fricções do robô e, após isto ser conseguido, incorporar essas fricções na estimação e fazer novos testes comparativos entre as forças obtidas pelo estimador e pelo sensor de força, para que seja possível concluir se este último pode ser substituído em tarefas que exijam um conhecimento preciso da força que está a ser efectuada.

9 Bibliografia

- [1] *Serdar Kucuk and Zafer Bingul (2006). Robot Kinematics: Forward and Inverse Kinematics, Industrial Robotics: Theory, Modelling and Control, Sam Cubero (Ed.),.*
- [2] H. Harry Asada. Introduction to robotics 2.12 lecture notes. 2005.
- [3] G.H. Ballantyne. Robotic surgery, telerobotic surgery, telepresence, and telementoring. *Surgical Endoscopy And Other Interventional Techniques Volume 16, Issue 10, pp 1389–1402*, 2002.
- [4] Barrett Technology, Inc. *WAM Users Guide AE-00*, 2006.
- [5] Peter J. Berkelman, Louis L. Whitcomb, Russell H. Taylor, and Patrick Jensen. A miniature microsurgical instrument tip force sensor for enhanced force feedback during robot-assisted manipulation. *IEEE Transactions on Robotics and Automation Volume: 19, NO. 5*, Oct. 2003.
- [6] Rui Cortesão, Walid Zarrad, Philippe Poignet, Olivier Company, and Etienne Dombre. Task-space and null-space control design for robotic-assisted minimally invasive surgery. In *Intelligent Robots and Systems, IEEE/RSJ International Conference on*. IEEE, 2006.
- [7] Rui Pedro Duarte Cortesão. Medical robotics. 2014/2015.
- [8] Joseph Sun de la Cruz, Dana Kulic, and William Owen. Learning inverse dynamics for redundant manipulator control. In *Autonomous and Intelligent Systems (AIS), International Conference on*. IEEE, 2010.
- [9] Pedro Luís Rodrigues de Queirós. Robotic tele-manipulation for minimally invasive surgery. Master’s thesis, Universidade de Coimbra, 2008.
- [10] Etienne Dombre. Introduction to surgical robotics. 2009.

- [11] Mohammad Mehdi Fateh and Hasan Farhangfard. On the transforming of control space by manipulator jacobian. *International Journal of Control, Automation, and of Systems*, Volume 6, No 1 pp 101-108, 2008.
- [12] Russel A. Faust. *Robotics in Surgery: History, Current and Future Applications*, chapter 1, pages 3–12. Nova Science Publishers, Inc., 2007.
- [13] N.G. Hockstein, C.G. Gourin, R.A. Faust, and D.J. Terris. A history of robots: from science fiction to surgical robotics. *Journal of Robotic Surgery*, Volume 1, Issue 2, pp 113–118, 2007.
- [14] Neville Hogan. Impedance control: An approach to manipulation: Part ii—implementation. *Journal of dynamic systems, measurement, and control*, 107(1):8–16, 1985.
- [15] Robotic Surgery <http://www.surgery.usc.edu/uppergi-general/roboticsurgery-gerd.html> Acedido em: 1/09/2016.
- [16] Arif Kazi. Operator performance in surgical telemanipulation. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments Volume 10 Issue 5*, Oct. 2001.
- [17] Uikyum Kim, Dong-Hyuk Lee, Woon Jong Yoon, Blake Hannaford, and Hyouk Ryeol Choi. Force sensor integrated surgical forceps for minimally invasive robotic surgery. *IEEE TRANSACTIONS ON ROBOTICS*, VOL. 31, NO. 5, 2015.
- [18] Chih-Hung King, Martin O. Culjat, Miguel L. Franco, Catherine E. Lewis, Erik P. Dutton, Warren S. Grundfest, and James W. Bisley. Tactile feedback induces reduced grasping force in robot-assisted surgery. *IEEE TRANSACTIONS ON HAPTICS*, Volume 2, NO. 2., APRIL-JUNE 2009.
- [19] B Kuebler, U Seibold, and G Hirzinger. Development of actuated and sensor integrated forceps for minimally invasive robotic surgery. *International Journal of Medical Robotics and Computer Assisted Surgery* pp 96-107, Jan. 2005.
- [20] António Mendes Lopes. Modelação cinemática e dinâmica de manipuladores de estrutura em série. 2001/2002.
- [21] Alessandro De Luca and Fabrizio Flacco. Integrated control for phri: Collision avoidance, detection, reaction and collaboration. In *The Fourth IEEE RAS/EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics*. IEEE, 2012.

- [22] Alessandro De Luca and Raffaella Mattone. Sensorless robot collision detection and hybrid force/motion control. In *Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. IEEE, 2005.
- [23] Michael Mistry and Ludovic Righetti. Operational space control of constrained and underactuated systems. In *Proceedings of Robotics: Science and Systems*, 2011.
- [24] Richard M. Murray, Zexiang Li, and Sastry. S.Shankar. *A Mathematical Introduction to Robotic Manipulation*, chapter 4, pages 155–194. CRC Press, 1994.
- [25] Shimon Y. Nof. *Handbook of Industrial Robotics, Volume 1*, chapter 4, page 96. John Wiley and Sons, 1999.
- [26] Javier Romero Otero, Philippe Paparel, Dash Atreya, Karim Touijer, and Bertrand Guillonneau. History, evolution and application of robotic surgery in urology. *Archivos Españoles de Urología* 60, 4 (335-341), 2007.
- [27] Pinyo Puangmali, Kaspar Althoefer, Lakmal D. Seneviratne, Declan Murphy, and Prokar Dasgupta. state-of-the-art in force and tactile sensing for minimally invasive surgery. *IEEE SENSORS JOURNAL, VOL. 8, NO. 4*, 2008.
- [28] Pinyo Puangmali, Hongbin Liu, Lakmal D. Seneviratne, Prokar Dasgupta, and Kaspar Althoefer. Miniature 3-axis distal force sensor for minimally invasive surgical palpation. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics Volume: 17, NO. 4*, Aug. 2012.
- [29] Jacob Rosen, Blake Hannaford, Mark P. MacFarlane, and Mika N. Sinanan. Force controlled and teleoperated endoscopic grasper for minimally invasive surgery — experimental performance evaluation. *IEEE TRANSACTIONS ON BIOMEDICAL ENGINEERING, Volume 46, NO. 10*, Oct. 1999.
- [30] Ulrich Seibold, Bernhard Kubler, and Gerd Hirzinger. Prototype of instrument for minimally invasive surgery with 6-axis force sensing capability. In *Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. IEEE, 2005.
- [31] Bruno Siciliano, Lorenzo Sciavicco, Luigi Villani, and Giuseppe Oriolo. *Robotics: modelling, planning and control*. Springer Science and Business Media, 2009.
- [32] Cristóvão Sousa, Rui Cortesão, and Luís Santos. Computed torque posture control for robotic-assisted tele-echography. In *Control and Automation (MED) 18th Mediterranean Conference on*. IEEE, 2010.

- [33] Cristóvão Jorge Silva Sousa. Co-manipulação complacente para cirurgia robótica. Master's thesis, Universidade de Coimbra, 2008.
- [34] Mark W. Spong, Seth Hutchinson, and M. Vidyasagar. *Robot Dynamics and Control*. Wiley India Pvt. Limited, 2008.
- [35] William Townsend. *Inertial Data for the WAM arm Rev AA-00*. Barrett Technology, Inc., 2007.
- [36] Ali Uneri, Marcin A. Balicki, James Handa, Peter Gehlbach, Russell H. Taylor, and Iulian Iordachita. New steady-hand eye robot with micro-force sensing for vitreoretinal surgery. In *Proceedings of the 2010 3rd IEEE RAS EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics*. IEEE, 2010.
- [37] Pietro Valdastri, Kanako Harada, Arianna Menciassi, Lucia Beccai, Cesare Stefanini, Masakatsu Fujie, and Paolo Dario. Integration of a miniaturised triaxial force sensor in a minimally invasive surgical tool. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering Volume: 53, NO. 11*, Nov. 2009.
- [38] Christopher R. Wagner, Nicholas Stylopoulos, Patrick G. Jackson, and Robert D. Howe. The benefit of force feedback in surgery: Examination of blunt dissection. *Presence Teleoperators and Virtual Environments pp 252-262*, 2007.
- [39] Nabil Zemiti, Guillaume Morel, Tobias Ortmaier, and Nicolas Bonnet. Mechatronic design of a new robot for force control in minimally invasive surgery. *IEEE/ASME TRANSACTIONS ON MECHATRONICS, Volume 12, NO. 2*, 2007.