Serviço de Pós-Gradução EESC/USP

EXEMPLAR REVISADO

Data de entrada no Serviço: 02 / 10 / 01

Ass.: Guilherme

CONTROLE SIMULTÂNEO DE FORÇA E POSIÇÃO PARA GARRAS ANTROPOMÓRFICAS

Paulo Marcos de Aguiar

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica

DEDALUS - Acervo - EESC

31100036786

ORIENTADOR: Prof. Dr. Glauco A. de Paula Caurin

EESC - USP Biblioteca Campus de S. Carlos

São Carlos
2001

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Engenheiro **PAULO MARCOS DE AGUIAR**

Dissertação defendida e julgada em 23-07-2001 perante a Comissão Julgadora:

aprovado

Prof. Dr. **GLAUCO A. DE PAULA CAURIN (Orientador)**
(Escola de Engenharia de São Carlos - USP)

aprovado

Profa. Dra. **MIRIAN PERCIA MENDES**
(Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação - USP)

aprovado

Prof. Livre-Doc. **JOÃO MAURICIO ROSÁRIO**
(Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP)

Prof. Associado **ARTHUR JOSÉ VIEIRA PORTO**
Coordenador do Programa de Pós-Graduação
em Engenharia Mecânica

MARIA DO CARMO CALIJURI
Vice-Presidente da Comissão de Pós-Graduação
em exercício

À minha querida mãe, que sempre me incentivou e dá exemplos, durante todo o tempo, de uma grande profissional e ser humano. Mamãe, você é maravilhosa!

Ao Prof. Glauco, pela orientação no trabalho, na vida acadêmica e pela amizade.

A todos os funcionários, professores e amigos que compartilharam comigo os momentos de trabalho e descontração.

Ao CNPq, pelo suporte financeiro para o desenvolvimento deste trabalho.

À Universidade de São Paulo que colabora de forma decisíva ao desenvolvimento do país.

A toda a minha família, que de perto ou de longe, cada um à sua forma, colaborou comigo.

À inestimável ajuda da professora Mirian Pérsia Mendes, do Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo, neste trabalho. Pela amizade, entusiasmo e prontidão que sempre dispensou a mim; que Deus a abençoe sempre!

A Deus e à memória das pessoas queridas, que tenho certeza intercedem por mim.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS vi

LISTA DE TABELAS vii

RESUMO viii

ABSTRACT ix

1. INTRODUÇÃO **1**

1.1. Robótica 1

1.2. Motivação 2

1.3. Objetivo 3

1.4. Prévia 3

2. TEORIA HELICOIDAL **5**

2.1. Introdução 5

2.2. Movimento Rígido de um Corpo Rígido no Espaço Euclidiano 8

2.3. Helicóides Recíprocos 16

3. CONTATOS **21**

3.1. Introdução 21

3.2. Contatos 22

3.3. Tipos de Contato 23

3.4. Efeitos de um Único Contato Entre Corpos 24

3.5. Modelo de Contato 25

3.6. Contato em Grupo 28

4. EQUILÍBRIO DE FORÇA **31**

4.1. Introdução 31

4.2. Aproximação Algébrica 33

5. MATRIZ G E ANÁLISE DE FORÇA E VELOCIDADE **40**

5.1. Introdução 40

5.2. Matriz Jacobiana 41

5.3. Matriz G 43

5.4. Análise de Forças Externas e Internas 44

5.5. Análise de Velocidades 45

6. RIGIDEZ 48
6.1. Introdução 48
6.2. Controle da Rigidez 48
6.3. Sensoriamento da Rigidez 52
6.4. Conclusões 54

7. SISTEMA DE CONTROLE 55
7.1. Introdução 55
7.2. Controlador Cinestático Simultâneo Para Força e Posição 57
7.3. Controlador Híbrido, Força/Posição, Tratamento Clássico 58
7.4. Simulação do Sistema de Controle Proposto 59
7.5. Simulação do Problema Objeto do Trabalho 63

8. TESTES E RESULTADOS 65
8.1. Introdução 65
8.2. Experimento 65
8.3. Aproximação Algébrica do Problema Para Teste 66
8.4. Resultados 67

9. CONCLUSÕES, OBSERVAÇÕES FINAIS E TRABALHOS FUTUROS 70
9.1. Conclusões 70
9.2. Observações Finais e Trabalhos Futuros 71

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 73
BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTAR 75
APÊNDICE 1 - Garras
APÊNDICE 2 - Coordenadas de Plücker

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1.1 - Contato Pontual com Atrito 07

FIGURA 3.4.1 - Modelos Cinemáticos de Contatos 26

FIGURA 3.5.1 - Interpretação Geométrica do Modelo de Atrito de Coulumb 28

FIGURA 4.1.1 - Cubo Restrito por 3 Linhas de Contato sem Atrito 32

FIGURA 4.2.1 - Objeto Fixado por um Contato Pontual com Atrito e por um Contato Pontual Suave 35

FIGURA 7.1.1 - Fotos do Protótipo da GAUSP (Garra Antropomórfica da USP) no Robô Scara 56

FIGURA 7.2.1 - Controlador Cinestático Simultâneo de Força e Posição 58

FIGURA 7.3.1 - Controlador Clássico Híbrido, Força/Posição 59

FIGURA 7.4.1 - Desenvolvimento de Projeto Paralelo 60

FIGURA 7.4.2 - Desenvolvimento de Projeto Integrado 60

FIGURA 7.4.3 - GAUSP – Representada no ADAMS – Movimento Durante Simulação e Graus de Liberdade de um Dedo, Respectivamente 61

FIGURA 7.4.4 - Entradas e Saídas do ADAMS e Aplicativo de Controle 62

FIGURA 7.4.5 - Integração do Sistema Mecânico com o Sistema de Controle 62

FIGURA 7.5.1 - Sistema Principal de Controle, Tela do Matlab 63

FIGURA 7.5.2 - Modelo Mecânico da GAUSP no ADAMS com suas Restrições 64

FIGURA 8.2.1 - Modelo do Objeto Sendo Restrito pelos Dedos 65

FIGURA 8.3.1 - *Wrenches* Aplicados no Objeto por 3 Pontos de Contato com Atrito 66

FIGURA 8.4.1 - Deslocamento das Extremidades dos Dedos 68

FIGURA 8.4.2 - Forças na Extremidade dos Dedos 69

LISTA DE TABELAS

TABELA - 3.3.1 Possibilidades de Contatos Entre Dois Corpos..... 24

TABELA - 3.4.1 Número de Graus de Liberdade para Diferentes Tipos de Contato..... 25

TABELA - 4.2.1 Sistemas Velocidades e Forças Generalizadas Para Diferentes Contatos.. 34

RESUMO

É apresentada uma aproximação para controle simultâneo de força e posição para garras antropomórficas, a fim de se obter uma manipulação segura de objetos e ferramentas. Para que a aproximação seja satisfatória, deve-se levar em consideração a variação da força e da posição no tempo, a geometria da garra, as características de rigidez, a geometria do objeto, as possibilidades e tipos de contato. A análise cinestática do sistema garra-objeto, é feita com o auxílio da Teoria Helicoidal. Esta teoria permite análises e representações de problemas complexos do espaço dimensional igual a seis, no espaço Euclidiano tridimensional. Isso é possível pois esta teoria foi desenvolvida utilizando as coordenadas de Plücker, que descrevem uma reta com seis informações. Essa abordagem traz vantagens quando comparada a métodos tradicionais e torna possível a obtenção de um controlador que considera a influência de cada dedo no processo da pega. No caso de robôs trabalhando de forma cooperativa, e no sistema de pega e manipulação de objetos, a mesma abordagem pode ser utilizada.

ABSTRACT

This work presents a simultaneous force and position control approach - a kinestatic controller -, applied to the manipulation of objects and tools using an anthropomorphic gripper. To approximate in a efficient way, the functions accomplished by a human hand, the controller should be conceived taking into consideration: the time-variable information of space and forces, the gripper geometry, the gripper elastic characteristics, the object geometry and the intermittent contacts possibilities. To take the gripper and object characteristics into consideration the screw theory was employed. The screw theory allows the analysis in the three-dimensional Euclidean space of six-dimensional complex problems. This is possible since the theory was based on Plücker coordinates, which are used to describe lines in space using six inputs. This theory provides several advantages when compared to anothers traditional methods. Using this theory it is possible to construct a controller that takes in account the fingers or robots (when it works cooperatively) influences in the grasping and manipulating processes.

1. INTRODUÇÃO

1.1. Robótica

A robótica estuda, entre outras coisas, sistemas mecânicos programáveis capazes de executar uma grande quantidade de tarefas. Assim, combina várias áreas como dinâmica, controle, mecanismos e programação. Porém, atualmente a robótica vem sendo interpretada por muitos fundamentalmente como algoritmos. Como os algoritmos computacionais, os algoritmos robóticos são descrições abstratas de processos em projetos e análise, independente de alguma implementação tecnológica particular GOLDBERG et. al. (1995).

A diferença entre os dois é que no algoritmo computacional tem-se o controle total dos dados aos quais ele se destina. Já o algoritmo robótico é aplicado a objetos físicos e, portanto, devem respeitar as leis naturais da física.

Assim como os computadores são máquinas que executam algoritmos computacionais, os robôs são máquinas que executam algoritmos robóticos.

No início os computadores eram aplicados somente a pesquisas militares e acreditava-se que estariam funcionando de forma exclusiva em instituições de pesquisa e indústrias. Hoje, porém, o que se vê é uma grande disseminação desses, aplicados aos mais diversos trabalhos e entretenimentos.

Os robôs atuais ainda estão muito restritos a operações determinadas e não estão habilitados a serem implementados com algoritmos de trabalho. Acredita-se que após atingirem um bom grau de desenvolvimento (flexibilidade), haverá uma grande transformação social na qual essas máquinas farão parte do dia a dia, estando integradas em nossos trabalhos, como ocorre com os computadores atualmente.

1.2. Motivação

O objeto deste estudo dentro da robótica são as garras, ou seja, os dispositivos localizados nas extremidades dos braços do robô. Mais especificamente, as garras antropomórficas (garras com múltiplos dedos) que vamos, muitas vezes, chamá-las de mãos. São elas que permitem a pega, a fixação e manipulação de objetos e que levam a conseqüente execução de tarefas. As garras são consideradas as garras como a interface entre os robôs e o meio de trabalho, estruturado ou não.

Num espaço de trabalho estruturado, como por exemplo as indústrias de produto seriado, as garras são bastante específicas. Apesar de permitir a fixação de objetos de formas conhecidas com grande segurança, não permitem a manipulação dos mesmos. Além disso, para se conseguir pequenos deslocamentos dessas garras industriais, os braços dos robôs, ou seja, os manipuladores, devem executar um grande movimento, que pode muitas vezes ser interpretado como um comportamento ineficaz.

Isso tudo leva a uma grande troca de garras para a execução de diferentes tarefas, o que causa perda de tempo e perda na eficiência. Além do que, tarefas simples de montagem não podem ser executadas pela impossibilidade de um controle preciso de força e posição.

Todos esses detalhes influenciam significativamente nos custos de produção e na qualidade do produto em relação às suas especificações técnicas. Em muitos casos há a necessidade da compra de mais de um robô para tornar uma tarefa mais ágil.

Quando nos deparamos com um espaço de trabalho não estruturado, como por exemplo as usinas nucleares, DELFET catálogo (1997), o fundo do mar, AMADEUS H.P. (1999) e O'BREIN, D. J. & LANE, D. M. (1998), ou o espaço DLR H.P.(1999), as tarefas a serem executadas são muito próximas das tarefas cotidianas. Sendo assim, já que as condições de trabalho são muito variadas, uma maior flexibilidade, que possibilite a manipulação de objetos diversos, e um controle mais preciso da força e posição se fazem necessários. Nessa categoria encontram-se os robôs construídos para pesquisa em campo e robôs para trabalhar em áreas inóspitas, por exemplo.

Ao obterem-se manipuladores com garras flexíveis e adaptáveis associadas a um controlador mais inteligente, certamente estará ocorrendo uma grande revolução do conceito de robôs no ambiente industrial. Com este orgão terminal mais flexível e inteligente, a possibilidade de utilizar os robôs com diferentes algoritmos robóticos torna-se mais próxima de ser alcançada.

1.3 Objetivo

O Objetivo inicial deste trabalho é desenvolver um controlador simultâneo de força e posição para garras antropomórficas, permitindo assim uma pega segura e manipulação de diferentes objetos. Para tanto, o controlador deve levar em conta a influência que cada dedo exerce no sistema de pega e manipulação, sistema em cadeia fechada. Este trabalho é parte de um projeto que visa obter um manipulador capaz de pegar objetos de formato previamente desconhecido e permitir sua manipulação, ou seja, executar vários tipos de tarefas diferentes. Assim será obtido um manipulador flexível e adaptável, podendo ser aplicado a inúmeros fins.

1.4 Prévia

Como foi visto, este trabalho pretende desenvolver um controlador simultâneo de força e posição para uma garra antropomórfica de 3 dedos, baseado em estudos cinestáticos. Este controlador deve atuar nos dedos da forma mais eficiente possível, e para isso diversas análises devem ser feitas.

No capítulo 2 é apresentado um requisito muito eficiente para o estudo do deslocamento de corpos rígidos e muito utilizado na robótica: a Teoria Helicoidal.

No capítulo 3 é feito um estudo sobre contatos, englobando desde tipos de contatos, seus efeitos, contatos únicos e em grupo, e modelo de contato.

No capítulo 4 destinado ao estudo do equilíbrio de forças, estuda-se as forças presentes no problema e a influência do contato. Utiliza-se a Teoria Helicoidal e obtém-se a matriz das forças generalizadas W .

No capítulo 5 é introduzida a matriz G, que rege a pega em cadeia fechada. O termo pega será aqui utilizado por melhor descrever a ação exercida pela garra, principalmente sendo antropomórfica, sobre objetos diversos. Distingue-se então a

pega da *fixação*. Um objeto pego não necessariamente está fixo à garra, e um movimento brusco do manipulador pode arremessá-lo repentinamente, o que não ocorre em uma pega segura.

No capítulo 6 é desenvolvido o estudo da rigidez presente no sistema da pega (garra-objeto).

No capítulo 7 aparece uma proposta de controlador simultâneo de força e posição para dedos cooperativos e a descrição de como foram desenvolvidas as simulações computacionais.

No capítulo 8 encontram-se o desenvolvimento matemático do problema específico deste trabalho, uma garra de três dedos pegando um objeto, e os resultados obtidos da simulação deste problema.

No capítulo 9 são feitas discussões, é apresentada a conclusão e as sugestões de trabalhos futuros, além de uma breve retrospectiva sobre o desenvolvimento deste trabalho.

2. TEORIA HELICOIDAL

2.1. Introdução

A *Screw Theory*, aqui chamada de Teoria Helicoidal, PHILLIPS, J (1984) e BALL, R. S. (1900), começou a ser concebida em 1800 com os estudos de CHASLES e POINSOT. Ela surgiu da necessidade de se entender os movimentos rígidos, de translação e de rotação, de um corpo rígido, do ponto de vista geométrico. Esta teoria é fundamentada nos dois resultados enunciados a seguir.

> 1. (CHASLES): *"Um corpo rígido pode se mover de uma posição a outra através de um movimento constituído de uma rotação sobre uma reta, chamada de eixo, seguida de uma translação paralela a essa mesma reta."*

Um movimento rígido, que é uma combinação de uma rotação com uma translação, é conhecido como *movimento (deslocamento) generalizado*. Observe que o movimento rígido descrito por CHASLES é um tipo particular de movimento generalizado. Ele lembra o movimento de um parafuso. Por isso, denomina-se *movimento helicoidal* (*screw*).

A versão infinitesimal de um movimento helicoidal fornece uma descrição da velocidade instantânea de um corpo rígido em termos de suas componentes linear e angular.

2. (POINSOT): *"Todo sistema de forças aplicado a um corpo rígido pode ser substituído por uma única força aplicada sobre uma reta (eixo), seguido de um torque (momento) aplicado sobre essa mesma reta."*

O movimento helicoidal leva aos conceitos chamados de força generalizada (*wrench*), representada por um "par" ω= (força, momento (torque)); e de velocidade generalizada (*twist*) associada à esse par, representada por um "par" ξ = (translação,rotação).

Embora concebida na época mencionada acima, essa teoria só foi realmente formalizada em 1900 por BALL, R. S. Matematicamente, essa formalização se dá com o uso da Álgebra Linear e Grupos de Matrizes e, mais abstratamente, pelo uso dos Grupos de Lie e das Álgebras de Lie.

Emprega-se de maneira essencial como ferramentas fundamentais as coordenadas homogêneas, para representar os movimentos rígidos, e a matriz exponencial, que a cada velocidade generalizada (*twist*) associa um movimento helicoidal (*screw*).

Neste trabalho, optou-se por fazer uso dessa teoria, ao invés de métodos tradicionais da cinemática de corpos rígidos porque ela:

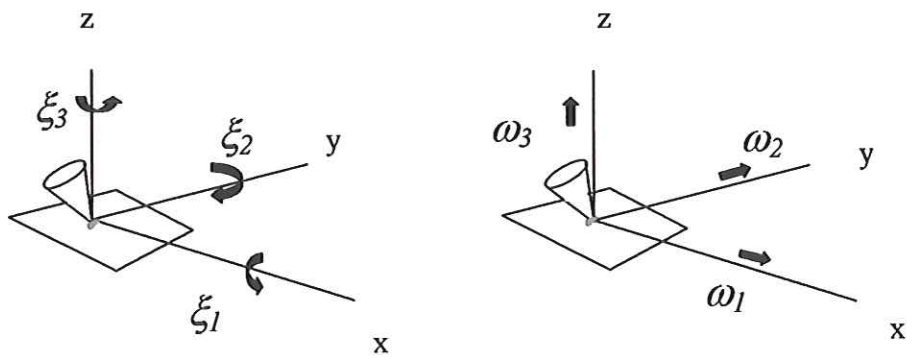
1) descreve globalmente o movimento de um corpo rígido que não sofre as singularidades devidas ao uso de coordenadas locais. Por exemplo, essas singularidades surgem naturalmente quando escolhe-se representar as rotações através dos ângulos de Euler;

2) fornece, na forma geométrica, a interdependência entre força e velocidade; todo o conjunto de forças e momentos que atua sobre um corpo rígido pode ser reduzido a uma força ao

longo de uma única reta de ação e um momento sobre esta reta , POINSOT (1848).

Para cada tipo de contato entre corpos rígidos está associado dois conjuntos de retas: um sobre o qual podem ser exercidas as forças generalizadas; e um outro sobre o qual podem ser exercidas as velocidades generalizadas.

Estes dois conjuntos de retas são duais, no sentido em que, ao se obter um deles, obtém-se automaticamente o outro. Isso pode ser visto no contato pontual com atrito analisado na figura abaixo.



$\xi_1 = (0,0,0,1,0,0)$
$\xi_2 = (0,0,0,0,1,0)$
$\xi_3 = (0,0,0,0,0,1)$

$\omega_1 = (1,0,0,0,0,0)$
$\omega_2 = (0,1,0,0,0,0)$
$\omega_3 = (0,0,1,0,0,0)$

Fig. 2.1.1 – Contato Pontual Com Atrito

Na figura 2.1.1, as velocidades generalizadas e as forças generalizadas são oriundas do tipo de contato. Observa-se, por exemplo, que tanto os vetores velocidade generalizada ξ_i (i = 1, 2, 3) quanto os vetores força generalizada ω_i (i = 1, 2, 3) possuem 6 coordenadas. No vetor velocidade generalizada, as três primeiras coordenadas representam os deslocamentos lineares, responsáveis pelas translações e as três últimas coordenadas representam os deslocamentos angulares, responsáveis pelas rotações. No vetor força generalizada, as três primeiras coordenadas

representam as forças e as três últimas os momentos aplicados ao objeto. Assim, a força generalizada que atua num corpo rígido consiste de uma componente linear (força) e uma componente angular (momento).

2.2. Movimento Rígido de um Corpo Rígido no Espaço Euclidiano

Aqui encontram-se os pré-requisitos matemáticos mínimos para o entendimento da Teoria Helicoidal. Todos os resultados aqui presentes podem ser encontrados em MURRAY, R. M. et. al. (1994), por isso, não serão demonstrados.

O movimento de um ponto no espaço Euclidiano (tridimensional) é descrito pela localização do ponto em cada instante, relativamente a um sistema de coordenadas cartesianas fixado. Em outras palavras, escolhe-se um conjunto de três eixos ortonormais e especifica-se a localização do ponto usando uma terna $(x,y,z)\in\mathbf{R}^3$, onde cada coordenada é dada pela projeção do ponto sobre o eixo correspondente.

Um *corpo rígido* é um conjunto de pontos onde a distância entre quaisquer dois de seus pontos permanece fixa apesar de qualquer movimento ou de forças exercidas sobre esse corpo.

Um movimento rígido é um movimento contínuo de pontos de um corpo que deixa a distância entre quaisquer dois de seus pontos fixa em todo instante. Além disso, pede-se que esse movimento preserve orientação, isto é, preserve produto vetorial. Formalizando essa idéia, matematicamente define-se:

Definição. Uma aplicação g: $\mathbf{R}^3 \rightarrow \mathbf{R}^3$ é um *movimento rígido* quando satisfaz as seguintes condições:

1) preserva distância: $\|g(p)-g(q)\| = \|p-q\|$, $p, q\in\mathbf{R}^3$;
2) preserva produto vetorial: $g_*(v\times w) = g_*(v) \times g_*(w)$, $v, w\in\mathbf{R}^3$.

Aqui, g_* denota a aplicação induzida de g, isto é, $g_*(v) = g(q) - g(p)$ onde $v = q - p \in \mathbf{R}^3$ e $\times$ denota o produto vetorial.

Essa definição permite usar resultados clássicos de Álgebra Linear.

Continuando com os pré-requisitos, observa-se que o fato da distância entre dois pontos ser preservada e também o produto vetorial não significa que seja impossível que pontos de um corpo rígido possam se mover uns em relação aos outros; mais precisamente, eles podem rotacionar (mas não transladar) uns em relação aos outros. Assim, para conhecer o movimento rígido de um corpo, precisa-se conhecer o movimento de qualquer ponto desse corpo rígido, bem como a rotação do corpo sobre esse ponto. Por isso, representa-se a configuração de um corpo rígido atrelando a algum de seus pontos um referencial cartesiano "móvel" e especifica-se o movimento desse referencial "móvel" em relação a um sistema de coordenadas cartesianas (referencial) fixo. Com isso, o movimento de pontos do corpo pode ser recuperado a partir do movimento do referencial "móvel" e do movimento do ponto no qual foi atrelado esse referencial. Lembre-se que todos os referenciais devem ser orientados pela regra da mão direita, isto é, se $x, y, z \in \mathbf{R}^3$ forma um conjunto ortonormal de vetores então z deve satisfazer $z = x \times y$.

Dando continuidade, apresenta-se um pouco do movimento de rotação no espaço Euclidiano.

A orientação de um corpo é descrita dando-se a orientação relativa entre o referencial "móvel" atrelado ao corpo e o referencial fixo. Assim, se A é o referencial fixo, B é o referencial "móvel" e $x_{AB}, y_{AB}, z_{AB} \in \mathbf{R}^3$ são as coordenadas dos eixos principais de B relativamente à A então a matriz real $\Re_{AB}$, 3×3, definida por: $\Re_{AB} := [x_{AB} \;\; y_{AB} \;\; z_{AB}]$ é a matriz de rotação do sistema.

Uma das propriedades dessa matriz é que o seu determinante $\det \Re_{AB} = \pm 1$.

Mais ainda, como trabalha-se com referenciais orientados pela regra da mão direita, isto é, com referenciais coordenados positivamente orientados, é possível verificar que, essas matrizes são, na verdade, ortogonais e de determinante 1. Denota-se o conjunto de todas tais matrizes 3×3 por ***SO(3)***. Assim,

$$\boldsymbol{SO(3)} := \{R \in M_{3\times3}(\mathbf{R}) : R\,R^t = I \text{ e } \det R = 1\}.$$

Aqui, $M_{3\times3}(\mathbf{R})$ é o conjunto de todas as matrizes reais 3×3 e I a matriz identidade 3×3.

Resultados clássicos de Álgebra permitem concluir que ***SO(3)*** com a operação de multiplicação de matrizes é um grupo com elemento identidade I. Esse grupo é conhecido como *grupo das rotações do* $\mathbf{R}^3$.

Usando algumas propriedades algébricas de produto vetorial, observa-se que toda matriz de rotação $R \in \boldsymbol{SO(3)}$ é a matriz de algum movimento rígido, segundo a definição dada.

Dando continuidade ao estudo sobre rotação...

Seja $w \in \mathbf{R}^3$ um vetor unitário que especifica a direção do eixo l de rotação de um corpo rígido e seja $\theta \in \mathbf{R}$ o ângulo de rotação em radianos. Como toda rotação corresponde a alguma $R \in \boldsymbol{SO(3)}$, seria interessante escrever a matriz R em função de w e θ. Isso leva a uma equação diferencial ordinária linear de primeira ordem cuja solução vai permitir chegar que $R = \mathbf{exp}(\hat{w}\,\theta)$ onde $\mathbf{exp}(\hat{w}\,\theta) = I + \hat{w}\,\theta + (\hat{w}\,\theta)^2/2! + (\hat{w}\,\theta)^3/3! + \ldots$ e $\hat{w} = \begin{pmatrix} 0 & -w_3 & w_2 \\ w_3 & 0 & -w_1 \\ -w_2 & w_1 & 0 \end{pmatrix}$ quando $w = (w_1, w_2, w_3)$.

Observe que a matriz real $\hat{w}$, 3×3, é uma matriz anti-simétrica, isto é, $(\hat{w})^t = -\hat{w}$ ($(\hat{w})^t$ é a matriz transposta de $\hat{w}$) e, mais, é "unitária" no sentido em que toma-se w um vetor unitário ($\|w\|=1$).

Denota-se o espaço vetorial real das matrizes anti-simétricas 3×3 por ***so(3)***.

Note que a dimensão desse espaço vetorial é 3.

Por conveniência, representa-se aqui toda matriz anti-simétrica como produto de uma matriz anti-simétrica unitária (no sentido mencionado acima) por um número real.

Dada $\hat{w} \in \boldsymbol{so(3)}$ e $\theta \in \mathbf{R}$ então $\mathbf{exp}(\hat{w}\,\theta) \in \boldsymbol{SO(3)}$. Tem-se assim a aplicação exponencial **exp:** $\boldsymbol{so(3)} \rightarrow \boldsymbol{SO(3)}$ que transforma matrizes anti-simétricas em matrizes ortogonais. Ainda mais, essa aplicação é sobrejetora sobre $\boldsymbol{SO(3)}$, isto é, dada $R \in \boldsymbol{SO(3)}$, existe um vetor unitário $w \in \mathbf{R}^3$ **e** $\theta \in \mathbf{R}$ tal que $R = \mathbf{exp}(\hat{w}\,\theta)$.

Com esses requisitos sobre rotação, pode-se agora olhar com mais cuidado os movimentos rígidos do espaço Euclidiano.

Em geral, movimentos rígidos consistem de rotações, translações e combinações desses.

As posição e orientação de um referencial "móvel" B atrelado a um corpo rígido em relação à um referencial fixo A são dados do seguinte modo.

Sejam $p_{AB} \in \mathbf{R}^3$ o vetor posição da origem do referencial B à origem do referencial A e $R_{AB} \in \boldsymbol{SO(3)}$ a orientação do referencial B relativamente à A . Se q_A, $q_B \in \mathbf{R}^3$ são as coordenadas de um ponto q relativamente aos referenciais A e B, respectivamente, então $q_A = p_{AB} + R_{AB}\, q_B$.

Uma *configuração do sistema* é o par (p_{AB}, R_{AB}) e *o espaço de configuração do sistema* é o produto cartesiano $\mathbf{R}^3 \times \boldsymbol{SO(3)}$ que vamos denotar por $\boldsymbol{SE(3)}$.

Observe que $(p_{AB}, R_{AB}) \in \boldsymbol{SE(3)}$.

Fazendo uso de coordenadas homogêneas, verifica-se que ***SE(3)*** é um grupo. E mais, através das matrizes de rotação, nota-se também que elementos de ***SE(3)*** representam movimentos rígidos.

Estende-se então a noção de aplicação exponencial de ***SO(3)*** para ***SE(3)***. Para tanto, introduz-se o espaço vetorial real ***se(3)*** := $\{(v, \hat{w}) : v \in \mathbf{R}^3, \hat{w} \in so(3)\} = \mathbf{R}^3 \times so(3)$. Observe que sua dimensão é 6. Denotando um elemento de ***se(3)*** por $\bar{\xi} = (v, \hat{w})$ e representando o mesmo em coordenadas homogêneas por $\hat{\xi} = \begin{pmatrix} \hat{w} & v \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$ então consegue-se estender a aplicação exponencial de ***so(3)*** para ***se(3)***. Isso significa dizer que dados $\hat{\xi} \in se(3)$ e $\theta \in \mathbf{R}$, a exponencial de $\hat{\xi}\,\theta$ é um elemento de ***SE(3)***. Aqui também, por conveniência, escreve-se todo elemento de ***se(3)*** como um produto de um elemento $\bar{\xi}$ de ***se(3)***, com $\|w\|=1$, por $\theta \in \mathbf{R}$

Tem-se então a aplicação exponencial **exp:*se(3)*→*SE(3)*** também sobrejetora.

Todo elemento $\hat{\xi} \in se(3)$ é chamado de *velocidade generalizada* (twist = gerador infinitesimal de ***SE(3)***) e o vetor 6-dimensional $\xi = (v,w)$ é chamado de *vetor velocidade generalizada*.

Note que as seis coordenadas do vetor ξ fornecem seis graus de liberdade: três referentes a translação e três referentes à rotação. Em outra palavras, como mencionado anteriormente, a velocidade generalizada $\hat{\xi}$ nada mais é do que um "par" $\xi = (v,w)$ onde v representa o deslocamento linear e w representa o deslocamento angular.

Com tudo isso, pode-se finalmente concluir agora que: *"todo movimento rígido pode ser escrito como a exponencial de alguma velocidade generalizada (twist)."*

Algumas propriedades geométricas das velocidades generalizadas são apresentadas a seguir.

Primeiramente, é preciso formalizar o conceito de helicóide (*screw*) e o conceito de movimento helicoidal (*movimento screw*).

Definição. Um *helicóide* S é uma terna (l, h, M). constituída por um eixo l, um passo h e uma amplitude M. Um *movimento helicoidal* é uma rotação de uma quantia $\theta = M$ sobre o eixo l seguida de uma translação de uma quantia $h\theta$ paralela a esse eixo l. Quando $h = \infty$ então o movimento helicoidal correspondente consiste de uma translação pura ao longo do eixo do helicóide de uma distância M.

Observe que o passo do helicóide é a razão da translação pela rotação quando assumimos $\theta \neq 0$.

É possível verificar que todo movimento helicoidal é um movimento rígido e que sendo assim, é gerado por algum vetor velocidade generalizada. Veja como associar um vetor velocidade generalizada a um helicóide dado:

Dado um helicóide $S = (l, h, M)$, se $q \in \mathbf{R}^3$ é um ponto do eixo l e $w \in \mathbf{R}^3$ é um vetor unitário que especifica a sua direção então l é dado pelo conjunto $\{q + \lambda w : \lambda \in \mathbf{R}\}$. Considerando $v = -w \times q$ e, daí, o vetor velocidade generalizada $\xi = (v,w)$ segue que $\mathbf{exp}(\hat{\xi}\,\theta)$, desde que $\theta \neq 0$, fornece o movimento helicoidal dado por S. Observe que se $\theta = 0$, isto é, no caso de não se ter rotação o eixo l é dado pelo conjunto $\{q + \lambda v$: v é um vetor unitário que especifica a direção da translação, $\lambda \in \mathbf{R}\}$ o que dá o vetor velocidade generalizada $\xi = (v,0)$.

O procedimento anterior diz que todo movimento helicoidal corresponde a um movimento ao longo de uma velocidade generalizada constante de uma quantia igual a amplitude do helicóide.

Avançando um pouco mais, pode-se a cada velocidade generalizada $\xi = (v, w)$ associar um helicóide $S = (l, h, M)$. Basta para isso, definir:

$h = (w.v)/\|w\|^2$, se $w \neq 0$ (observe que se $w = 0$ então tem-se uma translação pura e, portanto $h = \infty$)

$$l = \{(w \times v)/\|w\|^2 + \lambda w : \lambda \in \mathbf{R}\}, \text{ se } w \neq 0$$
$$\{0 + \lambda v : \lambda \in \mathbf{R}\}, \text{ se } w = 0$$

$$M = \|w\|, \text{ se } w \neq 0$$
$$\|v\|, \text{ se } w = 0$$

aqui "." é o produto escalar do $\mathbf{R}^3$. Note que nesse último raciocínio não foi assumido que $\|w\|=1$! Assume-se que $\|w\|=1$ (ou que $\|v\|=1$ quando $w=0$) então a velocidade generalizada $\hat{\xi}\,\theta$ tem amplitude $M=\theta$.

Finalmente, com esses requisitos todos chega-se ao resultado mencionado no início desse capítulo, a saber: o resultado de CHASLES.

Considerar agora forças e momentos atuando sobre corpos rígidos. Isso será usado para introduzir a noção de sistemas helicoidais e helicóides recíprocos.

Para um melhor entendimento, seria conveniente conferir a seção 4 do capítulo 2 de MURRAY, R. M. et. al. (1994).

Definição. Chamamos de *força generalizada* (*wrench*) ω um "par" $(f, m) \in \mathbf{R}^6$ onde $f \in \mathbf{R}^3$ é uma componente linear e $m \in \mathbf{R}^3$ é uma componente angular.

Desse modo, todo "par" (força, momento) é denominado neste trabalho força generalizada.

Deve ser observado que as coordenadas do vetor força generalizada dependem do sistema de coordenadas no qual a força e o momento estão representados.

Forças generalizadas e velocidades generalizadas são usadas para definir trabalho instantâneo. Usa-se para tanto o produto interno canônico do $\mathbf{R}^6$ (ou o produto escalar do $\mathbf{R}^3$): $\xi.\omega = v.f + w.m$.

Diz-se que duas forças generalizadas são *equivalentes* quando geram o mesmo trabalho para todos os possíveis movimentos de corpo rígido.

Forças generalizadas equivalentes podem ser usadas para escrever uma dada força generalizada em termos de uma força generalizada aplicada em um outro ponto.

O teorema dual ao teorema de Chasles, que é o teorema de Poinsot, estabelece que toda força generalizada é equivalente a uma força e um momento aplicados ao longo de um mesmo eixo.

Sabe-se que toda velocidade generalizada pode ser produzida por um helicóide e vice-versa. Veja agora a relação entre força generalizada e helicóide.

Dada a força generalizada $\omega = (f, m)$, associa-se à ela o helicóide $S = (l, h, M)$ onde:

$h = (f.m)/\|f\|^2$, se $f \neq 0$ (observe que se $f = 0$ então tem-se um momento puro e, portanto, $h = \infty$)

$$l = \{(f \times m)/\|f\|^2 + \lambda f : \lambda \in \mathbf{R}\}, \text{ se } f \neq 0$$
$$\{0 + \lambda m : \lambda \in \mathbf{R}\}, \text{ se } f = 0$$

$$M = \|f\|, \text{ se } f \neq 0$$

$$\|m\|, \text{ se } f = 0$$

aqui "." é o produto escalar do $\mathbf{R}^3$.

Com isso, tem-se o resultado de POINSOT.

A natureza dual das velocidades generalizadas e das forças generalizadas fica agora evidente. Por exemplo, uma velocidade generalizada com passo zero corresponde a uma rotação pura enquanto que uma força generalizada com passo zero corresponde a uma força pura.

2.3 Helicóides Recíprocos

O produto interno entre velocidades generalizadas e forças generalizadas dá a potência associada ao movimento de um corpo rígido através de uma força aplicada.

Diz-se que uma força generalizada ω é *recíproca* a uma velocidade generalizada ξ quando a potência é zero, isto é quando $\omega . \xi = 0$.

Isso significa que ξ não executa trabalho quando o corpo se desloca infinitesimalmente por ω.

Como ambas, velocidade generalizada e força generalizada, podem ser representadas por helicóides, pode-se dar agora a definição de helicóides recíprocos.

Definição. Dois helicóides S_1 e S_2 são *recíprocos* quando a velocidade generalizada ξ de S_1 e a força generalizada ω de S_2 são recíprocas.

A definição acima diz que os helicóides são representados por meio de vetores velocidade generalizada, então dois helicóides S_1 e S_2 são *recíprocos* quando $v_1.w_2 + v_2.w_1 = 0$ onde $\xi_1 = (v_1, w_1)$ representa a velocidade generalizada de S_1 e $\xi_2 = (v_2, w_2)$ representa a velocidade generalizada de S_2.

A mesma observação vale quando representa-se helicóides usando vetores força generalizada, isto é, dois helicóides S_1 e S_2 são *recíprocos* quando $f_1.m_2 + f_2.m_1 = 0$ onde $\omega_1 = (f_1, m_1)$ representa a força generalizada de S_1 e $\omega_2 = (f_2, m_2)$ representa a força generalizada de S_2.

Observe ainda que se um helicóide S é representado por um vetor força generalizada com seis coordenadas, isto é, $S = (S_1, S_2, S_3, S_4, S_5, S_6) =$ (componente linear, componente angular) então:

- o eixo l do helicóide é:

$$l = \{\left\{\frac{(S_1, S_2, S_3)\times(S_4, S_5, S_6)}{S_1^2 + S_2^2 + S_3^2}\right\} + \lambda(S_1, S_2, S_3) : \lambda \in \mathbf{R}\}$$

- o passo h do helicóide é:

$$h = \frac{S_1S_4 + S_2S_5 + S_3S_6}{S_1^2 + S_2^2 + S_3^2} \tag{2.3.1}$$

- a amplitude M do helicóide é:

$$M = \begin{cases} \sqrt{S_1^2 + S_2^2 + S_3^2} & \text{, se } h < \infty; \\ \sqrt{S_4^2 + S_5^2 + S_6^2} & \text{, se } h = \infty. \end{cases} \tag{2.3.2}$$

desde que $S_1^2 + S_2^2 + S_3^2 \neq 0$.

A importância dos helicóides recíprocos está na análise cinemática das propriedades dos mecanismos. Pode-se, por exemplo, no contexto de garras ver as forças generalizadas aplicadas a um corpo rígido como um conjunto de helicóides

limitadores e perguntar se existem velocidades generalizadas que não perturbam essa limitação. Tais velocidades generalizadas, se existem, correspondem a movimentos, do corpo agarrado, que não podem ser restritos pelos dedos.

Chama-se um conjunto de helicóides de *sistema de helicóides*.

Veja a seguir como fazer uma análise usando o conceito de um sistema de helicóides.

Suponha que o movimento de um corpo rígido está restrito pela aplicação de forças normais em vários pontos do mesmo. Será que existem quaisquer movimentos do corpo rígido que não podem resistir a essas forças? Considere $\{S_1, ..., S_k\}$ um sistema de helicóides correspondentes às forças generalizadas. Suponha que exista outro helicóide S_f tal que S_f é recíproco a cada S_i (i=1, ..., k). Então interpretando S_f como uma velocidade generalizada e cada S_i como uma força generalizada, observa-se que o movimento ao longo de S_f diz que trabalho algum deve ser feito contra qualquer uma das forças generalizadas. Agora, interpreta-se todos os helicóides dados do sistema como velocidades generalizadas e S_f então está dentro de um espaço vetorial real. Sendo assim, se S_f é recíproco à S_1, ..., S_k então é recíproco a toda combinação linear desses vetores e, daí, pode-se definir o conjunto de todos os helicóides que são recíprocos a um dado conjunto de helicóides.

O conjunto de todos os helicóides que são recíprocos a um sistema de helicóides é chamado de *sistema de helicóides recíprocos*.

Um sistema de helicóides recíprocos define um subespaço vetorial de velocidades generalizadas.

Interpretando-se um sistema de helicóides como um conjunto de forças generalizadas, então o sistema de helicóides recíprocos descreve os movimentos instantâneos (velocidades generalizadas) possíveis sob as forças generalizadas.

Um sistema de helicóides interpretados como um conjunto de forças generalizadas é chamado *sistema força generalizada*.

Interpretando-se um sistema de helicóides como um conjunto de velocidades generalizadas então, o sistema de helicóides recíprocos é o conjunto das forças generalizadas que não causam movimento algum ao objeto.

Um sistema de helicóides interpretados como um conjunto de velocidades generalizadas é chamado *sistema velocidade generalizada*.

Dados dois helicóides $S = (S_1, S_2, S_3, S_4, S_5, S_6)$ e $S' = (S'_1, S'_2, S'_3, S'_4, S'_5, S'_6)$, define-se o *produto virtual* de S por S', e denota-se por $S \# S'$, o número real dado por: $S_1 S'_4 + S_2 S'_5 + S_3 S'_6 + S_4 S'_1 + S_5 S'_2 + S_6 S'_3$.

A operação "#", de $\mathbf{R}^6$ x $\mathbf{R}^6$ em $\mathbf{R}$, definida acima é comutativa.

Diz-se que dois helicóides S e S' são :

1. *Repulsivos* quando seu coeficiente virtual $S \# S'$ é positivo;
2. *Contrários* quando seu coeficiente virtual $S \# S'$ é negativo.

Observe que quando dois helicóides S e S' são recíprocos, seu coeficiente virtual $S \# S'$ é zero.

A *ordem de um sistema de helicóides* é igual ao número de helicóides linearmente independentes que o constitui, desde que todos sejam considerados como velocidades generalizadas, ou todos como forças generalizadas. Se a mesma for igual a n então a ordem do sistema de helicóides recíproco é $6 - n$.

Observações:

1.Quando ξ é repulsivo à certo ω, então um trabalho positivo é realizado pela restrição da força generalizada quando o corpo está num deslocamento infinitesimal

pela velocidade generalizada. Isto implica que a velocidade generalizada pode ser realizada, mas o contato da força generalizada será definitivamente quebrado;

2.Quando ξ é contrário à ω um trabalho ("virtual") negativo deve ser feito pela restrição da força generalizada quando o corpo é deslocado infinitesimalmente por uma velocidade generalizada. Isto implica que tal deslocamento é impossível, ao assumir-se que os objetos são considerados rígidos.

Um corpo rígido onde atua um sistema de forças generalizadas é *livre* quando pode ser submetido a todas possibilidades de velocidades generalizadas, sem que ocorra a quebra de contato associada a essas forças. Diz-se que o corpo está *completamente limitado* (restrito) quando não pode ser submetido a qualquer velocidade generalizada sem a quebra do contato; caso contrário, tem-se *o corpo parcialmente limitado* (restrito).

Com esta teoria estuda-se o equilíbrio das forças generalizadas durante o processo de pega. Já o estudo das velocidades generalizadas não é formalmente descrito uma vez que, como é sabido, é dual das forças generalizadas.

3. CONTATOS

3.1. Introdução

A vantagem de uma garra ser antropomórfica é que além de permitir a pega de corpos de formatos diferentes, possibilita sua manipulação. A pega de um corpo é dita manipulável quando os dedos da garra conseguem acomodar diferentes movimentos desse corpo. Para poder trabalhar com a manipulação de corpos as propriedades a seguir devem ser levadas em conta :

1. Resistência a forças externas. As forças de contato devem ser suficientes para gerar uma força generalizada oposta a aplicada sobre o corpo. A pega, cujos dedos podem resistir a forças externas arbitrárias, é chamada de pega com força de encerramento (será visto com mais detalhes no capítulo 4).

2. Destreza de manipulação. Existe essa manipulação quando é possível mover o corpo de forma compatível com as tarefas desejadas, sem perder a pega.

Dado um corpo, deve-se encontrar locais e tipos de contato que permitam essas propriedades estarem sempre presentes durante a pega. No capítulo 5 é apresentado um método que atende essas exigências, através da matriz de pega (matriz G).

Para estudar a manipulação, antes é necessário saber quais as características do contato e sua influência no processo de pega e manipulação.

3.2. Contatos

Um corpo rígido que não está em contato com outros corpos rígidos está totalmente livre a qualquer tipo de movimento.

Quando esse corpo rígido entra em contato com outro corpo rígido, fixo num referencial, o movimento do primeiro fica limitado.

O grau em que cada contato restringe um movimento depende da natureza de cada contato, da posição e da orientação dos contatos relativos uns aos outros. Sendo assim, é importante:

1. definir rigorosamente o significado de contato;
2. identificar e classificar os efeitos dos tipos comuns de contato entre corpos;
3. desenvolver a base matemática para determinar quantitativamente o movimento permitido a um corpo restrito por um ou mais contatos.

Por *contato* entende-se um conjunto de pontos adjacentes onde áreas (superfície) contíguas se tocam.

Duas áreas de contato disjuntas são consideradas como dois contatos distintos.

No limite, um ponto isolado de toque é considerado uma área de contato.

Um corpo rígido livre tem seis graus de liberdade, ou seja, são necessários seis parâmetros para especificar completamente sua localização no espaço. Para os deslocamentos infinitesimais podem ser considerados três parâmetros para deslocamentos angulares e três parâmetros para deslocamentos lineares de um ponto do corpo. Para deslocamentos finitos podem ser considerados, por exemplo, os três ângulos de Euler, especificando a mudança de orientação, e as três componentes para o deslocamento de um ponto do corpo, como o centro de gravidade.

Como mencionado, quando um corpo rígido entra em contato com outro corpo rígido, o último fixo num referencial, o movimento do primeiro fica limitado. Para se

estudar as possibilidades de movimento que surgem quando ocorre um contato entre dois corpos, é necessário levar em consideração quatro fatores:

1. A limitação imposta pelo formato de cada área de contato;
2. As localizações relativas das áreas de contato;
3. A orientação relativa de cada área de contato;
4. O efeito do atrito em cada área de contato.

Muitas análises cinemáticas de contato desconsideram o atrito, o que leva a restrições somente estruturais. Neste trabalho considera-se, no contato, o atrito como um limitador de movimento e, sendo assim, assume-se que as forças de contato e os coeficientes de atrito são grandes o suficiente para causar resistência a uma força contrária.

3.3. Tipos de Contato

Para cada tipo de superfície há 3 tipos de contatos.

Uma superfície é considerada:

1. *Ponto de contato* quando seus dois principais raios de curvatura são muito pequenos ou iguais a zero;
2. *Linha de contato* quando um dos raios de curvatura for muito pequeno ou zero e o outro for infinito.
3. *Plano de contato* quando ambos os raios de curvatura são infinitos.

Com isso, é possível analisar a maioria dos movimentos instantâneos entre os corpos. Na tabela a seguir encontram-se as nove possibilidades de contato entre dois corpos.

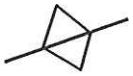
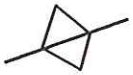
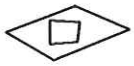
	Ponto	Linha	Plano
Ponto			
Linha			
Plano			

Tabela 3.3.1 – Possibilidades de Contato Entre Dois Corpos

Através da tabela 3.3.1 é possível notar que existem essencialmente três tipos de contato:

1. *Contato Pontual* (ponto sobre um plano, plano sobre um ponto e reta sobre uma reta não paralela);
2. *Contato Linear* (reta sobre plano ou plano sobre reta);
3. *Contato Planar* (plano sobre plano).

3.4. Efeitos de um Único Contato Entre Corpos

Pode-se ainda classificar um contato, de acordo com a liberdade relativa de movimento permitido entre dois corpos, em cinco categorias:

1. Contato com um grau de liberdade (*g.d.l.*). Contato em que somente um parâmetro é necessário para especificar os movimentos relativos do corpo, desde que o contato seja mantido; (5 restrições de movimento)
2. Contato com dois g.d.l. Contato em que são necessários dois parâmetros para especificar os movimentos relativos do corpo, desde que mantido o contato;

O mesmo vale para 3, 4 e 5 graus de liberdade.

Dentro de cada uma dessas cinco classificações pode haver uma variedade de configurações físicas que têm o mesmo número de graus de liberdade. Em uma conexão tipo rótula e uma conexão tipo planar, por exemplo, tem-se a mesma forma de contato, ou seja, com três g.d.l., embora os movimentos permitidos sejam diferentes. O número de graus de liberdade de cada tipo de contato depende se o atrito é considerado ou não, como pode ser visto na tabela 3.4.1 a seguir.

	Número de Graus de Liberdade	
	Sem atrito	Com atrito
Contato Pontual	5	3
Contato Linear	4	1
Contato Planar	3	0

Tabela 3.4.1 – Número de Graus de Liberdade Para Diferentes Tipos de Contato

Há um outro modelo de contato muito comum que é chamado de *contato pontual suave* (*soft finger contact*). Ele se comporta como um contato pontual com atrito, exceto que sua área de contato é grande o suficiente para torná-lo capaz de resistir a momentos sobre a normal de contato, o que leva a dois g.d.l.. Os modelos cinemáticos de contatos e seus graus de liberdade estão ilustrados na figura 3.4.1.

3.5. Modelo de Contato

O contato entre o dedo e o corpo rígido pode ser descrito pelas forças generalizadas resultantes num ponto de referência do corpo, oriundas da força exercida pelo dedo no ponto de contato. As forças aplicadas no contato e sobre o corpo podem ser representadas como um conjunto de sistemas de referenciais localizados em cada contato entre o dedo e o corpo, levando-se em consideração o referencial atrelado ao corpo.

Normalmente um dedo não exerce forças em todas as direções. No caso de um contato pontual sem atrito, as forças podem ser aplicadas somente na direção normal à superfície do corpo, e daí representa-se a força generalizada (W) aplicada como:

$$W_{ci} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} f_{ci} \qquad , f_{ci} \geq 0 \qquad (3.5.1)$$

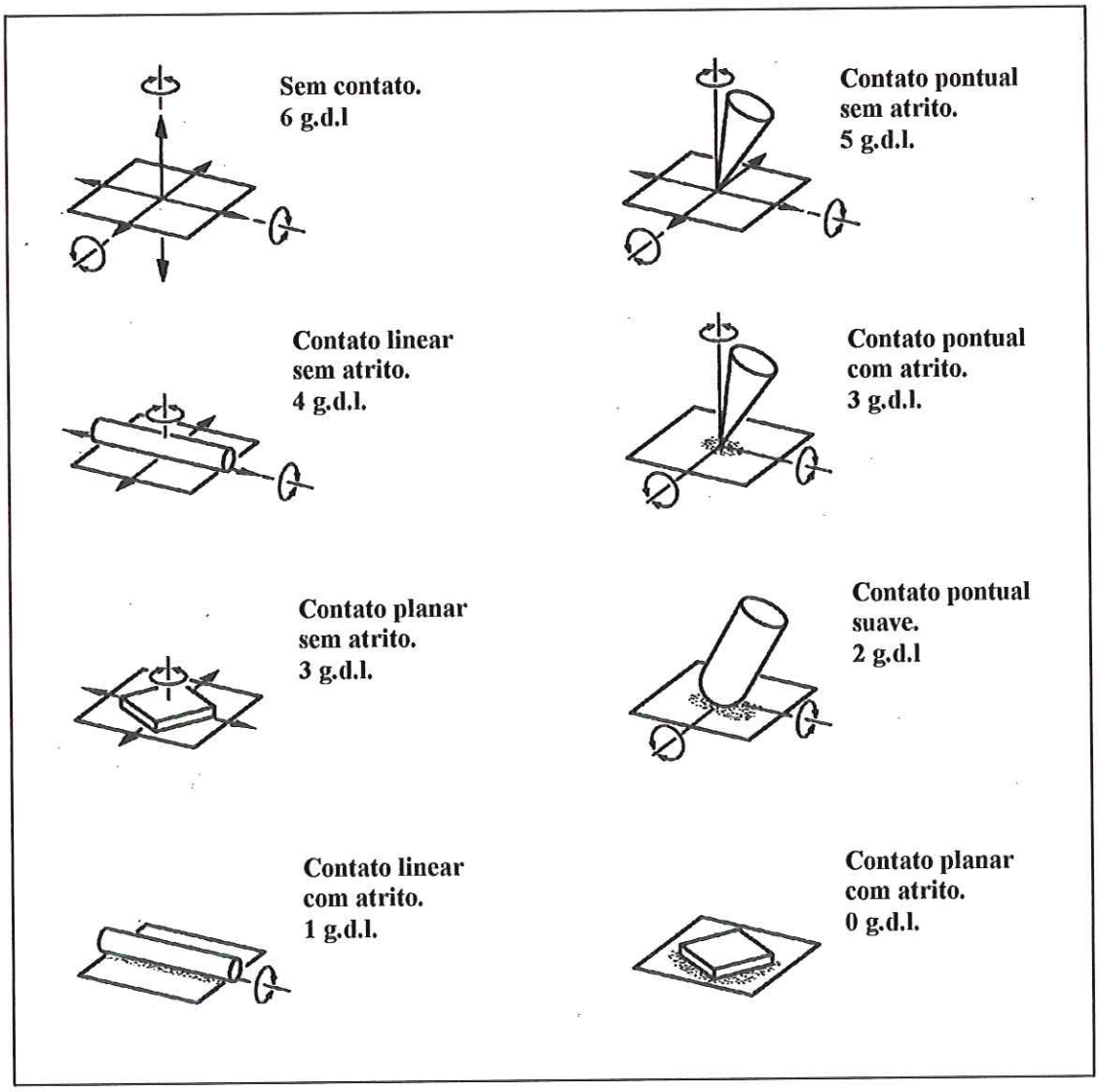


Figura 3.4.1 – Modelos Cinemáticos de Contato

onde $f_{ci} \in \mathbf{R}$ é a amplitude (intensidade) da força aplicada pelo dedo na direção normal. Essa força deve ser positiva uma vez que o dedo somente pode empurrar o corpo e não puxá-lo, o que originaria a perda de contato.

Pontos de contato sem atrito não ocorrem freqüentemente em situações práticas, mas esse modelo é útil quando o atrito envolvido é muito pequeno ou desconhecido. Quando for necessário utilizar o atrito, um modelo simples e muito utilizado é o modelo de atrito de Coulomb, CAURIN (1993),MASON (2000). Esse é um modelo empírico no qual as forças tangenciais são proporcionais à força normal aplicada, e a constante de proporcionalidade é função do material dos corpos em contato. Sendo $f^t \in \mathbf{R}$ a intensidade da força tangencial e, $f^n \in \mathbf{R}$ a intensidade da força normal, segundo a lei de Coulomb, o escorregamento começa quando :

$$|f^t| > \mu f^n \tag{3.5.2}$$

onde $\mu > 0$ é o coeficiente de atrito estático. Isso implica que a força de atrito tangencial que pode ser aplicada no contato é:

$$|f^t| \leq \mu f^n \tag{3.5.3}$$

A equação 3.5.3 pode ser representada geometricamente como mostrado na figura 3.5.1 . As forças que podem ser aplicadas no contato devem pertencer ao cone centrado sobre a superfície normal. Esse cone é chamado de *cone de atrito* (FC, *friction cone*). O ângulo em referência a normal é dado por :

$$\alpha = \tan^{-1} \mu \tag{3.5.4}$$

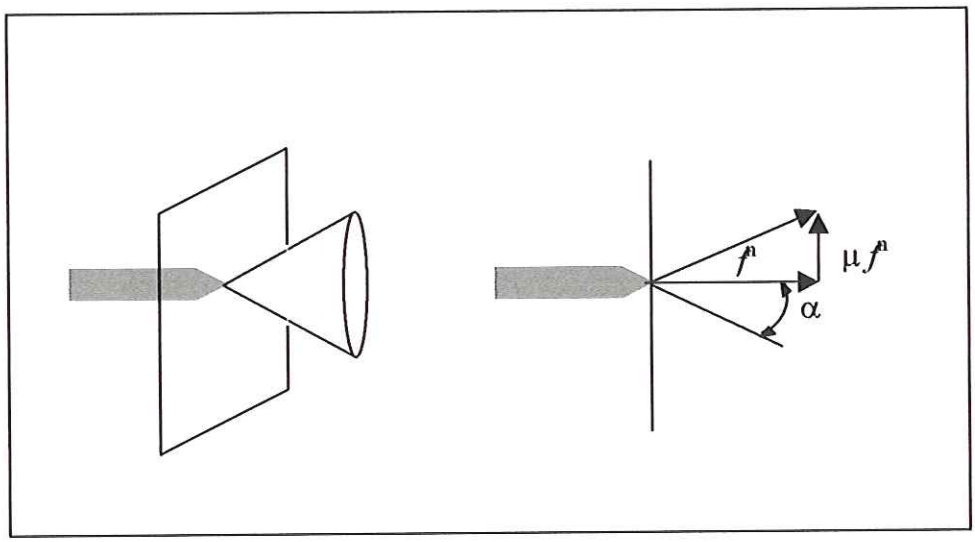


Figura 3.5.1 – Interpretação Geométrica do Modelo de Atrito de Coulomb

O modelo de contato pontual com atrito é usado quando existe atrito entre a extremidade do dedo e o corpo. A força generalizada aplicada ao corpo, em relação às direções básicas (que estão de acordo com o modelo de atrito) é representada por:

$$W_{ci} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} f_{ci} \qquad (3.5.5)$$

onde $f_{ci} \in FC_{ci}$ e $FC_{ci} = \left\{ f \in \mathbf{R}^3 : \sqrt{f_1^2 + f_2^2} \leq \mu f_3, f_3 \geq 0 \right\}$

3.6. Contato em Grupo

O efeito de vários contatos sobre um corpo pode ser visto do aspecto do movimento e da força.

Em termos de movimento, cada contato limita um determinado sistema de velocidades generalizadas.

Quando vários contatos agem simultaneamente sobre o corpo, o movimento possível do corpo passará a ser a interseção dos sistemas de velocidades generalizadas gerados em cada contato. Geometricamente, o sistema de velocidades generalizadas resultante é o subconjunto formado pelas velocidade generalizadas de cada contato que possuem o eixo e o passo iguais.

Do ponto de vista da força, o sistema de forças generalizadas, que pode ser aplicado quando um corpo é restrito simultaneamente por vários contatos, é a união dos sistemas de forças generalizadas de cada contato. Algebricamente, o conjunto de forças generalizadas é dado por ω, como visto abaixo (onde ω_i são as coordenadas helicoidais das forças generalizadas principais de cada contato) e $\underline{c}$ é um vetor arbitrário das intensidades das forças generalizadas.

$$\omega = [\omega_1, \omega_2 \ldots\ldots \omega_n]c \tag{3.6.1}$$

A aproximação dos aspectos do movimento e da força são equivalentes, visto que fornecem a mesma informação. Se S_i é um sistema helicoidal sobre o qual o corpo executa uma velocidade generalizada, o sistema helicoidal recíproco, chamado nesse momento de SR_i, é aquele em que as forças generalizadas podem ser aplicadas no corpo. Encontrar o sistema helicoidal recíproco é o mesmo que encontrar seu complemento no espaço homogêneo $\mathbf{R}^6$. Então são verdadeiras as propriedades:

$$S_i \cup SR_i = \mathbf{R}^6 \tag{3.6.2}$$

$$S_i \cap SR_i = \varnothing \tag{3.6.3}$$

A equação 3.6.2 estabelece que forças generalizadas arbitrárias podem ser aplicadas ao corpo, imobilizando-o, desde que a união de todos os sistemas de forças generalizadas de contato abrangem todo o $\mathbf{R}^6$. Deve-se observar com bastante

atenção a equação 3.6.3, que estabelece que o corpo está imobilizado quando a interseção de todas as velocidades generalizadas aplicadas a ele é um conjunto vazio. Analisando-se de forma algébrica, o corpo está imobilizado quando o posto da matriz, formada pelas coordenadas helicoidais das forças generalizadas principais de contato, é seis.

No próximo capítulo esses conceitos são utilizados no estudo de uma pega de corpo por vários dedos. Onde, algebricamente, é verificado quando o corpo está restrito (limitado) e quando a pega é segura.

4. EQUILÍBRIO DE FORÇAS

4.1. Introdução

Uma propriedade importante na pega é atingir o equilíbrio entre as forças generalizadas externas que agem no objeto e as forças generalizadas aplicadas apropriadamente através dos dedos nos pontos de contato. Por exemplo, utilizando uma garra antropomórfica para se erguer um objeto de uma bancada, aplica-se ao objeto forças no sentido contrário ao da gravidade. Dependendo da tarefa haverá resistência a forças generalizadas em outras direções. Isto não é trivial de se conseguir, visto que as forças devem estar contidas no cone de atrito (item 3.5) para que não ocorra escorregamento entre o objeto e a extremidade dos dedos.

Quando os dedos de uma garra pegam um objeto, surgem forças generalizadas positivas ou negativas. Na realidade, o contato que ocorre comumente entre os corpos é somente num sentido, visto que dois corpos em contato por um ponto podem somente empurrar um ao outro; nunca puxar (em condições normais de trabalho). *Essas forças que ocorrem somente em um sentido são denominadas forças internas. Elas são um conjunto de forças aplicadas ao objeto e com resultante nula.* Para que uma pega segura ocorra, na maioria dos casos, a força de atrito é fundamental e como sua magnitude depende do produto do coeficiente de atrito pela força normal, é necessário que esta seja ao menos positiva.

Percebe-se então que para existir uma pega, o sentido de algumas forças generalizadas tem que ser positivo, isto é, ter sentido único. Mesmo que a matriz das forças generalizadas tenha posto 6, o que vale dizer que todas as forças perturbadoras podem ser assimiladas pela pega. Essa pega ainda poderá ser mantida se ocorrerem forças de encerramento, termo introduzido por REULEAUX (1963). O conjunto de

forças de perturbação direcionadas no sentido que favorecem a pega é chamado de *força de encerramento*. No entanto, se as forças generalizadas que atuam no objeto puderem resistir a quaisquer forças generalizadas de distúrbio, existe a *forma de encerramento* ou *restrição completa*.

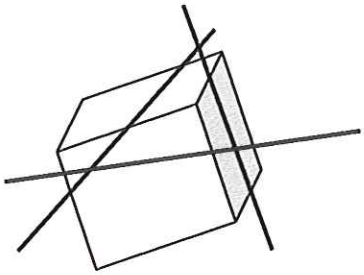


Fig. 4.1.1 - Cubo Restrito por 3 Linhas de Contato sem Atrito.

No exemplo acima observa-se que qualquer força de perturbação tendendo a empurrar o cubo contra as arestas irá manter o contato (forças de encerramento) e qualquer outra força irá causar a quebra do contato permitindo que o cubo se mova.

REULEAUX (1963) demonstrou que para um movimento planar sem atrito são necessários ao menos quatro pontos de contato para ter-se uma restrição completa do objeto. LAKSHIMIRAYANA (1978), demonstrou que para a restrição completa de um objeto 3D no espaço são necessários ao menos 7 pontos de contato sem atrito. Em ambas demonstrações o fato das forças generalizadas, exercidas por um ponto de contato sobre o objeto terem um único sentido, foi adotado. Como será visto a frente, há certas formas de contato e forças de atrito que podem ser aplicadas a um objeto completamente restrito, sem que o equilíbrio seja perdido. Através da aproximação algébrica é possível identificar essas *forças internas*, que permitem avaliar se uma determinada pega irá restringir completamente o objeto ou não. A aproximação geométrica fornece a visualização destas forças internas e é recomendada apenas para casos mais simples. Neste trabalho será desenvolvida somente a aproximação algébrica.

4.2. Aproximação Algébrica

Assume-se que n forças generalizadas atuam sobre o objeto, das quais p têm sentido único e portanto n-p são bidirecionais podendo atuar no sentido positivo ou negativo.

Monta-se então a matriz das forças generalizadas, W, que será da forma (6 x n). Nas p primeiras colunas têm-se os vetores de único sentido representando as forças generalizadas em coordenadas helicoidais :

$$W = [\omega_1, \omega_2, \omega_3, \ldots\ldots, \omega_p, \omega_{p+1}, \ldots\ldots\ldots \omega_n] \qquad (4.2.1)$$

Para aplicar ao objeto um conjunto de forças generalizadas que resista às forças externas que atuam sobre ele, como força peso e forças que surgem do encontro do objeto com obstáculos do meio, é necessário encontrar o vetor das intensidades das forças generalizadas, $\underline{c}$, que satisfaça :

$$W\underline{c} = \underline{\omega} \qquad (4.2.2)$$

onde o vetor $\underline{\omega}$ representa as intensidades das forças externas.

Os primeiros p elementos de $\underline{c}$ devem ser positivos, pois são os coeficientes dos elementos da matriz W que têm sentido único (forças internas).

Se n = 6 e W tem posto 6, então $\underline{c} = W^{-1}\,\underline{\omega}$. Devem existir ao menos 7 forças generalizadas aplicadas sobre o objeto para conseguir restringi-lo completamente. No caso de n = 7 tem-se a seguinte solução para a equação 4.2.2 :

$$\underline{c} = \underline{c}_p + \lambda\underline{c}_h \qquad (4.2.3)$$

onde :

$\underline{c}_p$ = é a solução particular da equação 4.2.2

$\underline{c}_h$ = é a solução homogênea para a equação 4.2.2

λ = é uma variável livre arbitrária, que determina a magnitude da força interna.

Segundo Lakshiminarayana , se todos os $\lambda\underline{c}_h$ são positivos para qualquer valor de $\underline{c}_p$, pode-se encontrar um vasto número de λ que deixará todos os elementos de $\underline{c}$ positivos satisfazendo a equação 4.2.2. No caso deste trabalho, preocupa-se somente com os primeiros p elementos. A solução homogênea pode ser interpretada como um conjunto de *bias* de forças que objetivam, sem quebrar o equilíbrio do objeto,

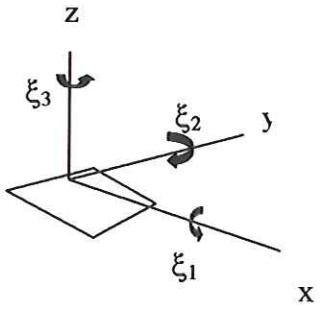
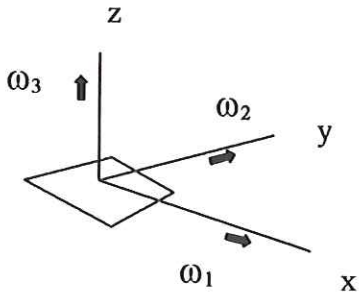
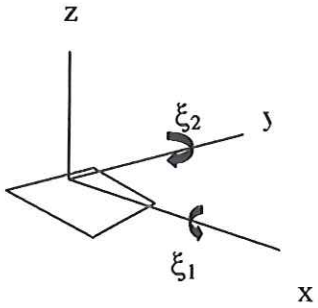
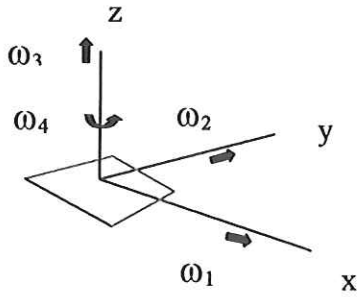
Tipo de contato/ g.d.l.	Sistema de vel. generalizadas	Sistema de forças generalizadas
Pontual com atrito/3	 ξ_1 = (1,0,0,0,0,0) ξ_2 = (0,1,0,0,0,0) ξ_3 = (0,0,1,0,0,0)	 ω_1 = (1,0,0,0,0,0) ω_2 = (0,1,0,0,0,0) ω_3 = (0,0,1,0,0,0)
Pontual suave/2	 ξ_1 = (1,0,0,0,0,0) ξ_2 = (0,1,0,0,0,0)	 ω_1 = (1,0,0,0,0,0) ω_2 = (0,1,0,0,0,0) ω_3 = (0,0,1,0,0,0) ω_4 = (0,0,0,0,0,1)

Tabela 4.2.1 – Sistemas Velocidades e Forças Generalizadas Para Diferentes Contatos

aumentar algumas ou todas as forças de contato até que tornem-se positivas. No exemplo da figura 4.2.1, um objeto está sendo fixado por 2 dedos. Um dos dedos proporciona um contato pontual com atrito e o outro um contato pontual suave. Na tabela 4.2.1 temos as forças e velocidades generalizadas desses dois tipos de contato.

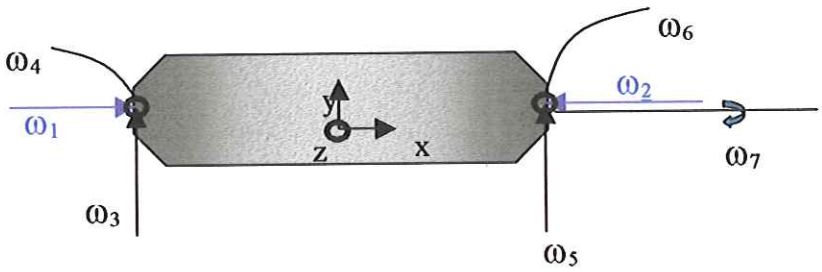


Figura 4.2.1 – Objeto Fixado por um Contato Pontual com Atrito e por um Contato Pontual Suave.

Nota-se que ω_1 e ω_2 são forças normais à superfície e portanto não podem mudar de sentido para que a pega seja mantida e permitir que as outras 5 forças generalizadas exerçam força, a qual depende do atrito. Observando-se as forças generalizadas tem-se :

ω_1 e ω_2 = forças generalizadas de sentido único;

ω_3 a ω_6 = forças generalizadas com contribuição somente em forças;

ω_7 = força generalizada com contribuição somente em momento.

Então sabemos que p = 2

E é possível montar a matriz das forças generalizadas a seguir :

$$W = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Pode-se então encontrar a solução homogênea que representa as forças internas:

$$W \lambda \underline{c}_h = 0 \qquad (4.2.4)$$

$$\underline{c}_h = [\, x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7 \,]^T$$

de 4.2.4 tem-se :

$$\begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \\ x_6 \\ x_7 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Efetuando-se as operações acima determina-se que :

$x_1 = x_2$

e

x_3 a $x_7 = 0$

então :

$\underline{c}_h = [\ x_1, x_1, 0, 0, 0, 0, 0\ ]^T$

$\underline{c}_h = x_1[\ 1, 1, 0, 0, 0, 0, 0\ ]^T$

neste caso : $x_1 = \lambda$

de 4.2.4 chegamos a intensidade das forças internas para este exemplo :

$\underline{c}_h = [1, 1,0,0,0,0,0]^T$

Como os dois primeiros elementos da solução homogênea são positivos, conclui-se que a pega será mantida mediante a forças generalizadas de perturbação e o objeto encontra-se completamente restrito.

Define-se a partir de agora q como a nulidade de W, isto é, a dimensão do espaço em que tem-se todas as soluções da matriz das forças generalizadas, então $q \leq n - 6$. Assim a nulidade será maior do que 1 quando mais que 7 forças generalizadas atuarem sobre o objeto.

A solução homogênea terá mais que q variáveis livres, as quais poderão ser escolhidas permitindo que os primeiros p elementos de $\underline{c}$ sejam positivos, então haverá mais de um conjunto de forças internas.

Cada solução homogênea que permite os p elementos de $\underline{c}$ ficarem positivos, deve ser analisada. A solução terá dimensão q e pode ser representada da seguinte forma:

$$\underline{c}_h = (\underline{c}_{1,h}\,\lambda_1 + \underline{c}_{2,h}\lambda_2 + \ldots\ldots\ \underline{c}_{q-1,h}\lambda_{q-1} + \underline{c}_{q,h}\lambda_q) \qquad (4.2.5)$$

Os q elementos de 4.2.5 são os vetores base que preenchem todo o espaço nulo de dimensão q, no caso do exemplo 4.2.1, q = 1. Há dois casos em que tem-se certeza que os primeiros p elementos de $\underline{c}$ podem ser considerados positivos :

1. Se os primeiros p elementos de 4.2.5 tiverem o mesmo sinal, então a escolha adequada de λ_i correspondente nos garantirá o sentido positivo dos primeiros p elementos.
2. Se houver q ≥ p variáveis livres e os primeiros p elementos de 4.2.5 preencherem todo o espaço de dimensão p.

Isso permite arbitrarem-se valores para os primeiros p elementos de 4.2.5 com escolhas convenientes dos λ_i. Em todos os outros casos, é necessário resolver o conjunto de desigualdades lineares para determinar a existência de valores de λ que tornem os primeiros p elementos $\underline{c}_h$ positivos. Como demonstrado no exemplo a seguir:

Ex. 4.2.2 :

Num caso em que q = 2 e pretende-se que os 4 primeiros elementos (p) sejam positivos, pode-se trabalhar somente com estes 4 elementos de cada vetor :

$$\underline{c}_h = \left(\begin{bmatrix} a \\ b \\ c \\ d \end{bmatrix}\lambda_1 + \begin{bmatrix} e \\ f \\ g \\ h \end{bmatrix}\right)\lambda_2 \qquad (4.2.6)$$

Se todos os elementos dos vetores da equação 4.2.6 tiverem o mesmo sinal, um dos dois grupos de desigualdades abaixo poderá ser obtido encontrando-se um valor oportuno para λ_1.

$$\begin{aligned} a\lambda_1 + e &> 0 \\ b\lambda_1 + f &> 0 \\ c\lambda_1 + g &> 0 \\ d\lambda_1 + h &> 0 \end{aligned} \qquad \begin{aligned} a\lambda_1 + e &< 0 \\ b\lambda_1 + f &< 0 \\ c\lambda_1 + g &< 0 \\ d\lambda_1 + h &< 0 \end{aligned}$$

(4.2.7 a) (4.2.7 b)

Supondo a,b,c,d,f,g,h =1 e f,e = -1; não há nenhum valor de λ_1 que solucione qualquer uma das desigualdades acima. Já se todos os elementos forem 1, $\lambda_1 = 2$ é uma solução possível para 4.2.7a, o que levará a uma pega na qual o objeto encontra-se completamente restrito, objetivo principal deste capítulo.

A matriz das forças generalizadas aqui desenvolvida, *W*, será utilizada de forma direta no próximo capítulo na construção da matriz G. Todos os conceitos necessários para permitir uma pega segura introduzidos neste capítulo serão utilizados em todo o trabalho.

5. MATRIZ G E ANÁLISE DE FORÇA E VELOCIDADE

5.1. Introdução

No estudo cinestático (estático e movimento instantâneo) da pega, em termos da cinemática, observa-se a formação de cadeias fechadas. Já em termos da estática distingue-se as forças envolvidas em externas e internas. A matriz de transformação G, SALISBURY (1982), permite o trabalho num universo cinestático e a obtenção das 4 relações básicas necessárias para o sensoriamento e controle na manipulação de corpos por garras antropomórficas, que serão vistas ainda neste capítulo. G é uma matriz quadrada de posto e dimensão iguais ao número das n forças generalizadas principais que são aplicadas ao corpo. Esta matriz, em uma primeira fase, é definida pelo tipo de contato que temos entre o corpo e os dedos que atuam no corpo, e portanto só precisa ser recalculada caso o tipo de contato seja alterado. Assim pode-se dizer que a matriz G é constante para determinada pega. As *forças generalizadas que atuam sobre o corpo* serão representadas por $\mathcal{F}$. No caso de manipulação por garras, cadeia fechada, $\mathcal{F}$ incluirá o conjunto de forças generalizadas que atuam sobre o corpo e as intensidades das forças internas presente nesta pega. Da mesma forma $\mathcal{V}$ será utilizado para representar as *velocidades generalizadas do corpo*. Para uma cadeia fechada além do conjunto de velocidades generalizadas contarão também as intensidades das velocidades internas.

Os dedos, nesse caso, podem ser interpretados como transdutores que permitem sentir e controlar as forças generalizadas e os deslocamentos ou velocidade aplicados pelo dedo sobre o corpo CRAIG (1989).

A função da matriz G pode ser entendida comparando-a com a matriz jacobiana, J. A matriz G está para a manipulação em cadeia fechada assim como a J está para a manipulação em cadeia aberta.

A matriz G^{-T}, por exemplo, relaciona as forças nas extremidades dos dedos com as forças externas que agem sobre o corpo e as forças internas que mantêm a pega.

5.2. Matriz Jacobiana

Segue uma breve explanação sobre a matriz jacobiana.

Essa matriz é uma forma derivativa multidimensional. Supondo, por exemplo, que temos 6 funções e cada uma delas é função de 6 variáveis independentes :

$$
\begin{aligned}
y_1 &= f_1(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6); \\
y_2 &= f_2(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6); \\
&\;\;\vdots \\
y_6 &= f_6(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6);
\end{aligned}
\qquad (5.2.1)
$$

Utilizando a notação vetorial para descrever as equações acima :

$$Y = F(X) \qquad (5.2.2)$$

Agora, para calcular o diferencial de y_i como função do diferencial de x_i, usa-se a regra da cadeia para simplificar e obtem-se:

$$\delta y_1 = \frac{\partial f_1}{\partial x_1}\delta x_1 + \frac{\partial f_1}{\partial x_2}\delta x_2 + \ldots + \frac{\partial f_1}{\partial x_6}\delta x_6$$

$$\delta y_2 = \frac{\partial f_2}{\partial x_1}\delta x_1 + \frac{\partial f_2}{\partial x_2}\delta x_2 + \ldots + \frac{\partial f_2}{\partial x_6}\delta x_6$$

$$\vdots \qquad (5.2.3)$$

$$\delta y_6 = \frac{\partial f_6}{\partial x_1}\delta x_1 + \frac{\partial f_6}{\partial x_2}\delta x_2 + \ldots + \frac{\partial f_6}{\partial x_6}\delta x_6$$

As equações acima podem ser escritas de forma mais simples e elegante vetorialmente :

$$\delta Y = \frac{\partial F}{\partial X}\delta X \qquad (5.2.4)$$

A matriz 6x6 das derivadas parciais, representada na equação acima, é o que chama-se de Matriz Jacobiana, J. Nota-se que se as funções $f_1(X)$ a $f_6(X)$ não são lineares, então as derivadas parciais são função de x_i e podem ser escritas da seguinte forma :

$$\delta Y = J(X)\,\delta X \qquad (5.2.5)$$

Dividindo ambos os lados da equação acima pelo elemento diferencial de tempo, pode-se interpretar a matriz Jacobiana conectando as velocidades de X com as de Y, então:

$$\dot{Y} = J(X)\,\dot{X} \qquad (5.2.6)$$

Em um determinado instante, X tem um certo valor sendo J(X) uma transformação linear, em um novo instante, X terá um novo valor. Conclui-se então que a Jacobiana é uma transformação linear que varia no tempo e depende do referencial adotado. Em termos de robótica a Jacobiana é utilizada para relacionar as velocidades das juntas, θ, com a velocidade na extremidade do braço do manipulador, V :

$$\underline{V} = J(\theta)\,\underline{\dot{\theta}} \qquad (5.2.7)$$

No domínio da força, para casos estáticos, e utilizando o princípio das potências virtuais, CRAIG (1989), a Jacobiana é utilizada para relacionar o torque exercido nas juntas, τ, com a força que a extremidade do braço do manipulador exerce, $\underline{f}$:

$$\underline{\tau} = J^T\,\underline{f} \qquad (5.2.8)$$

5.3. Matriz G

De forma similar à J, a matriz G permite determinar quais forças generalizadas do contato dos dedos devem ser atuadas para aplicar um conjunto de forças desejado sobre o corpo.

Devido as forças serem exercidas sobre o corpo por juntas paralelas, as projeções para encontrar os elementos de G, geometricamente, terão a forma inversa. Então serão obtidas G^{-T} e G^{-1} , assim G^T e G serão encontradas aplicando-se a matriz de inversão. Para montar-se a matriz G^{-T} primeiro tem-se que montar a matriz *W* (4.2.1), e fazer uma análise, conforme descrita no capítulo anterior, no intuito de garantir a plena restrição do corpo. Isso requer que o posto da matriz seja 6 e que os primeiros p elementos de $\underline{c}$, correspondentes as forças generalizadas de contato de sentido único possam ser arbitrados positivos. Então tem-se que a matriz G^{-T} é formada pelos

argumentos (6 x n) da matriz W e pelos (n – 6) n-elementos, vetores base, da solução homogênea.

$$G^{-T} = \begin{bmatrix} W \\ \hline \underline{c}^{T}_{1,h} \\ \cdot \\ \cdot \\ \underline{c}^{T}_{n-6,h} \end{bmatrix} \qquad (5.3.1)$$

A matriz G^{-T} será quadrada e assumindo que os (n – 6) $c_{i,h}$ são linearmente independentes e preenchem o espaço nulo (n – 6) de W, G^{-T} também será inversível.

5.4. Análise de Forças Externas e Internas

Define-se força generalizada composta como :

$$\underline{\mathcal{J}} = \left[f_x , f_y , f_z , m_x , m_y , m_z , \lambda_1 , \ldots\ldots \lambda_{n-6} \right]^T \qquad (5.4.1)$$

Onde os primeiros 6 elementos representam as forças generalizadas aplicadas sobre o corpo (forças externas), e os n – 6 restantes representam a magnitude das forças internas. Sendo $\underline{F}$ definido como um vetor das intensidades das forças generalizadas de contato para um contato de n forças generalizadas, entre o dedo e o objeto, então:

$$\underline{F} = \left[c_1 , \ldots\ldots\ldots , c_n \right]^T \qquad (5.4.2)$$

$$\underline{\mathcal{J}} = G^{-T} \underline{F} \qquad (5.4.3)$$

$$\underline{F} = G^{T} \underline{\mathcal{J}} \qquad (5.4.4)$$

No caso de uma garra utilizando 3 pontos de contato com atrito para fixar um corpo, $\underline{F}$ seria composta por 9 elementos.

Utilizando-se a equação 5.4.3 pode-se determinar quais forças externas estão atuando sobre o corpo e quais forças internas estão sendo suportadas pelos dedos. Isso é possível obtendo-se as intensidades de força e momentos, que estão presentes nos dedos durante a pega, através de sensores.

Já a equação 5.4.4 pode ser utilizada para criar um conjunto controlado de forças internas, garantindo que as forças generalizadas de único sentido mantenham-se desta forma (através de λ_i). Assim é possível, por exemplo numa tarefa de montagem, encaixar uma peça em um orifício sem que o contato seja quebrado, através do controle das forças internas.

5.5. Análise de Velocidades

As relações da velocidade na pega serão definidas através dos princípios da conservação da energia, utilizando o significado de entrada e saída de energia no sistema.

$\underline{V}$ é o vetor das intensidades das velocidades generalizadas por unidade de tempo ocorrendo ao longo do eixo das forças generalizadas em cada contato.

$$\underline{V} = \left[d_1, \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots, d_n\right]^T \tag{5.5.1}$$

Para a mesma condição da pega dada por 3 contatos com atrito, haverá um vetor com 9 componentes. Sendo os elementos de $\underline{V}$ as intensidades do movimento ao longo do eixo correspondente às forças generalizadas de contato, tem-se:

$$\underline{F}^T \underline{V} = \sum_{i=1}^{n} c_i d_i \tag{5.5.2}$$

A equação acima representa a soma da energia entrando nos pontos de contato, como resultado do movimento ao longo dos eixos de aplicação de forças.

Define-se $\underline{\mathcal{V}}$ como sendo um vetor onde os 6 primeiros elementos representam as velocidades linear e angular e as outras n - 6 γ_is componentes são velocidades virtuais resultantes da deformação do corpo, então :

$$\underline{\mathcal{V}} = \left[v_x, v_y, v_z, \omega_x, \omega_y, \omega_z, \gamma_1, \ldots\ldots\ldots \gamma_{n-6}\right]^T \tag{5.5.3}$$

Assim o trabalho :

$$\underline{\mathcal{F}}^T \underline{\mathcal{V}} = f_x v_x + f_y v_y + f_z v_z + m_x \omega_x + m_y \omega_y + m_z \omega_z + \lambda_1 \gamma_1 + \ldots\ldots \lambda_{n-6} \gamma_{n-6} \tag{5.5.4}$$

é a soma da energia que é usada para executar o trabalho no ambiente e da energia que se acumula nas deformações do corpo.

As forças internas λ_i podem não ser nulas, mas não podem realizar trabalho pois significa que está ocorrendo um escorregamento na pega e/ou as condições de contorno estão sendo violadas.

Igualando-se a energia de entrada com a energia de saída mais a taxa de energia acumulada, e utilizando a equação 5.4.3, tem-se :

$$\underline{F}^T \underline{V} = \underline{\mathcal{F}}^T \underline{\mathcal{V}} = (F^T G^{-1}) \underline{\mathcal{V}} \tag{5.5.5}$$

e sendo $F \neq 0$

$$\underline{V} = G^{-1} \underline{\mathcal{V}} \tag{5.5.6}$$

Invertendo :

$$\underline{\mathcal{V}} = G \underline{V} \tag{5.5.7}$$

A equação 5.5.6 :

$$\underline{V} = G^{-1}\underline{\mathcal{V}}$$

permite determinar qual o conjunto de velocidades dos dedos (velocidades generalizadas oriundas do contato) para se imprimir uma velocidade desejada no corpo.

A equação 5.5.7, permite saber qual a velocidade do corpo, bem como se está ocorrendo escorregamento, através de um conjunto de medidas da velocidade do dedo.

Determinou-se então as 4 relações básicas necessárias para o sensoriamento e controle na manipulação de corpos pegos por uma garra antropomórfica, que são:

1) $$\underline{\mathcal{F}} = G^{-T}\,\underline{F}$$

2) $$\underline{F} = G^{T}\,\underline{\mathcal{F}}$$

3) $$\underline{\mathcal{V}} = G\underline{V}$$

4) $$\underline{V} = G^{-1}\underline{\mathcal{V}}$$

Nota-se que a transformação G é de fundamental importância e a dualidade de força e velocidade, que é um princípio de mecanismos, fica evidente, uma vez que as transformações de força e velocidade podem ser derivadas uma da outra.

6. RIGIDEZ

6.1. Introdução

Num mecanismo de juntas, a rigidez determina a intensidade das forças a serem aplicadas interna ou externamente para ocorrer um certo deslocamento. A flexibilidade da junta determina qual deslocamento ocorre quando nela aplica-se um conjunto de forças. Portanto, nota-se que rigidez é o oposto da flexibilidade. Neste caso o interesse é na rigidez da junta, que permite determinados movimentos de um mecanismo e restringe outros quando um objeto está sendo manipulado por um braço ou mão.

Num braço, o objeto de trabalho está no final de uma cadeia cinemática aberta, já no caso de uma mão, o objeto está no meio de uma cadeia fechada. Em ambos os casos há duas formas de rigidez: (A) a de forma natural, que depende do projeto estrutural e de propriedades do material, e (B) a de forma artificial ou controlada, que é obtida através do controlador da força aplicada sobre as juntas. Comandando o atuador de forças das juntas em resposta aos movimentos do objeto, esse poderá se comportar de forma elástica e eficiente para tarefas de montagem, SALISBURY (1980).

6.2. Controle da Rigidez

Como condição necessária para a estabilidade num sistema elástico tem-se que qualquer deflexão da posição nominal causará uma força que tenderá a voltar o sistema à posição de origem. Em termos de energia, significa dizer que um trabalho deverá ser realizado no sistema para causar um deslocamento da posição original.

Para uma mola unidimensional, a força f que tem de ser aplicada para que haja um certo deslocamento é :

$$f = k\,x \tag{6.2.1}$$

A energia, E, armazenada na mola quando ela é esticada de uma distância x é :

$$E = \tfrac{1}{2}\,(kx^2) \tag{6.2.2}$$

O termo x^2 é sempre positivo e qualquer deflexão irá resultar num acúmulo positivo de energia na mola, desde que k seja positivo. Num sistema elástico multidimensional, com uma matriz de rigidez K, força generalizada $\underline{f}$ e deslocamento generalizado $\underline{x}$, a relação :

$$\underline{f} = K \,.\, \underline{x} \tag{6.2.3}$$

determina quais forças devem ser aplicadas para defletir certa mola de um determinado valor. Neste caso a energia armazenada no sistema quando uma mola é deslocada a partir de uma posição inicial é :

$$E = \frac{1}{2}\underline{x}^T K \underline{x} \tag{6.2.4}$$

A energia armazenada será positiva se a matriz de rigidez, K, for positiva. Um exemplo óbvio é se K for uma matriz diagonal com todos os seus elementos positivos. A condição de K ser positiva é mantida se ela estiver sujeita a forma da transformação congruente, STRANG (1976).

$$K \leftarrow C^T K C \tag{6.2.5}$$

Onde C é uma matriz não-singular. Esta é a matriz exata que se encontra quando a orientação de uma matriz de rigidez de um objeto fixado é representada nas coordenadas da junta.

Assim, se a matriz de rigidez de um objeto fixado é positiva, a matriz de rigidez transformada para as coordenadas da junta também será positiva e qualquer perturbação das juntas resultará em forças que tenderão a retorná-la à posição original. Para transformar a rigidez desejada de um objeto das coordenadas do referencial da mão (K_c) em coordenadas da junta do braço, K_θ , tem-se que :

$$\underline{\mathcal{F}} = K_C \delta \underline{x}$$

$$\underline{\tau} = J^T \underline{\mathcal{F}} \qquad (6.2.6)$$

$$\delta_{\underline{x}} \approx J \delta \underline{\theta}$$

Onde τ é um vetor de forças ou torques do atuador da junta, $\delta\underline{x}$ é um pequeno deslocamento generalizado na mão e $\delta_{\underline{\theta}}$ é um vetor dos deslocamentos da junta. Então :

$$\tau = J^T K_C J \delta \underline{\theta} = K_\theta \delta \underline{\theta} \qquad (6.2.7)$$

onde :

$$K_\theta = J^T K_C J \qquad (6.2.8)$$

É a nova matriz de rigidez nas coordenadas das juntas do braço. Pode-se notar que K_θ em geral não é uma matriz diagonal. Fazendo-se K_θ diagonal (correspondendo cada junta com o comportamento de uma mola independente) a deflexão de qualquer junta interfere na força comandada de todas as outras juntas e dela mesma.

A matriz espacial da rigidez das juntas será definida positiva se o posto da matriz J for igual ao posto da matriz K_c (normalmente 6).

Durante uma operação pode-se acrescentar *bias* de forças, $\mathcal{F}_b$, sobre o objeto, para suportar, por exemplo, a gravidade ou outra força qualquer, mantendo as forças de contato positivas.

EESC - USP
Biblioteca
CAMPUS DE S. CARLOS

Para estabelecer o controle da rigidez na presença de *bias* de força, com um braço, a equação para os torques das juntas é:

$$\underline{\tau} = K_0 \delta \underline{\theta} + J^T \underline{\mathcal{F}}_0 \tag{6.2.9}$$

Deste ponto em diante, as equações serão redefinidas para as coordenadas das juntas dos dedos, isto é, em cadeia fechada e a matriz G será utilizada nas relações. Para iniciar este estudo deverão ser acrescidas na matriz K_c o número de forças internas independentes presentes na pega. Assim é estabelecida a rigidez interna, que tem por objetivo estabilizar a pega e manter as forças de contato positivas. Será usado o índice d para esta nova situação.

$$K_{Cd} = \mathrm{diag}(k_x, k_y, k_z, g_x, g_y, g_z, k_1, \ldots\ldots\ldots k_p) \tag{6.2.10}$$

Na matriz K_c os primeiros 6 elementos da diagonal principal representam a rigidez referente a rotação e translação do objeto de interesse e os últimos p elementos correspondem à rigidez interna. A seguir tem-se a matriz Jacobiana composta :

$$J = \begin{bmatrix} J_1 & 0 & 0 \\ 0 & J_2 & 0 \\ 0 & 0 & J_3 \end{bmatrix} \tag{6.2.11}$$

Na matriz anterior (6.2.11) temos a representação de 3 dedos. Cada J_i relaciona a velocidade da iésima junta do dedo com a velocidade do ponto de contato desse dedo. Assim, o torque nas juntas dos dedos necessário, em uma cadeia fechada, para aplicar a força generalizada, $\underline{\mathcal{F}}$, no objeto é dado por :

$$\underline{\tau}_d = J^T G^T \underline{\mathcal{F}} \tag{6.2.12}$$

Tendo-se a medida das velocidades das juntas dos dedos, Ω, é possível determinar a velocidade generalizada do objeto pego, dada por :

$$\underline{\mathcal{V}}_d = GJ\underline{\Omega} \tag{6.2.13}$$

A matriz resultante da rigidez das juntas dos dedos requerida para o comportamento da rigidez da mão segundo a equação 6.2.10 é dada por :

$$K_{\theta d} = J^T G^T K_c G J \qquad (6.2.14)$$

Com a aplicação das *bias* de força o conjunto dos torques requeridos nas juntas, em cadeia fechada, é:

$$\underline{\tau_d} = K_{\theta d} \delta \underline{\theta} + J^T G^T \underline{\mathcal{F}}_0 \qquad (6.2.15)$$

A formulação nas equações 6.2.9 e 6.2.15 pode ser usada com vantagem no controle da rigidez de braços e mãos respectivamente, tendo o conjunto de efeitos do comportamento representados de forma cartesiana, que são baseados somente nas quantidades sentidas e controladas diretamente na junta. O esforço computacional será menor desde que os sensores e atuadores estejam diretamente locados nas juntas.

Os valores de J e G não mudam rapidamente, assim o processo de atualização pode ser mais lento que a taxa de retroalimentação do servo. Foi derivada, então, a relação necessária para estabelecer o controle da rigidez e das *bias* de forças para um braço ou mão articulada.

6.3. Sensoriamento da Rigidez

Utilizando o controle de rigidez para executar tarefas, é essencial saber ou determinar as restrições impostas por contatos entre o objeto e corpos presentes no ambiente, durante a manipulação.

A razão é que se deseja que o objeto tenha pouca rigidez para movimentos na direção de restrição e grande rigidez para movimento em direção sem restrição. Isso assegura que não haverá forças de contato excessivas enquanto estiver sendo executado um movimento contra uma restrição, devido a uma informação de posição não muito correta. OHWOVORIOLE (1980), estabeleceu um método para caracterizar os estados de uma tarefa de montagem através de restrições presentes em cada estágio da operação. Isso é útil para determinar em cada estágio a restrição

imposta pelo meio ao objeto através do contato. Essa informação pode ser descrita determinando a rigidez do meio como vista pelo objeto. Os eixos de movimento com rigidez baixa ou zero representam que não há restrição presente, enquanto rigidez alta ou infinita indica a presença de restrições. Com o método a seguir é possível obter-se a rigidez do meio, K_E, e assim caracterizar as restrições que atuam sobre o objeto.

Primeiro é estabelecida uma rigidez nominal controlada, K_θ, para o objeto utilizando a equação 6.2.8 ou 6.2.14. Então comandando o objeto para se mover em 6 direções linearmente independentes e preferivelmente ortogonais, com um pequeno deslocamento, $\underline{x}_i$, as forças resultantes causadas pelo contato com o meio, $\underline{f}_i$, são obtidas e formam-se duas matrizes (6 x 6) :

$$\mathcal{X} = \left[\underline{x}_1, \underline{x}_2, \underline{x}_3, \underline{x}_4, \underline{x}_5, \underline{x}_6\right] \qquad \Phi = \left[\underline{f}_1, \underline{f}_2, \underline{f}_3, \underline{f}_4, \underline{f}_5, \underline{f}_6\right]$$

As medidas do deslocamento e força obedecem a relação:

$$\Phi = -(K_C^{-1} + K_E^{-1})^{-1}\mathcal{X} \tag{6.3.1}$$

Resolvendo para K_E temos :

$$K_E = -\Phi(\mathcal{X} + K_C^{-1}\Phi)^{-1} \tag{6.3.2}$$

É necessário que a rigidez nominal K_C seja inversível, isso garante que K_C seja não singular. Por exemplo, se todas as forças lidas forem iguais a 0 ($\Phi = 0$) então K_E, poderia ser uma matriz nula indicando que a restrição é imposta pelo meio. Por outro lado, se forem encontrados valores de $\Phi = -K_C\mathcal{X}$, então K_E teria 6 autovalores infinitos, indicando que o objeto está completamente restrito.

6.4. Conclusões

Estabeleceu-se um método para o controle e sensoriamento da rigidez. Na prática seria construída a matriz de rigidez com base no conhecimento das restrições da tarefa e a trajetória de montagem seria traçada. Imprecisões na informação da posição seriam absorvidas pela acomodação natural do controlador. As tarefas em que as restrições tendem a aumentar podem ser monitoradas através do sensoriamento da rigidez.

Os métodos descritos para controlar mãos podem ser aplicados da mesma forma para operações com multi-braços, onde cada braço funciona como um dedo.

7. SISTEMA DE CONTROLE

7.1 Introdução

Para realizar o controle de força em garras, o sensoriamento é realizado normalmente no punho RAIBERT & CRAIG (1980) e/ou nas juntas dos dedos PAUL & WU (1980). No caso do método baseado na locação do sensor no punho, há uma redução de controlabilidade, oriunda da própria configuração do mecanismo nesta região que não permite aproximações muito boas, possibilitando apenas o uso de pequenos valores de ganho no servo. Num sistema onde o controle de forças é baseado em informações de esforços (ou deformações) medidas nas juntas, no qual um sensor é associado com um atuador, há um bom ganho no servo. Assim, um servo pode ser visto como uma tentativa de correção para uma atuação e controle que não são perfeitos, suavizando efeitos como o atrito das engrenagens, perda de curso (folgas) e a não-linearidade do atuador. No entanto sistemas de juntas requerem que efeitos da gravidade (e possivelmente forças dinâmicas) sejam modelados para conseguir informações de força na mão vindas dos dados dos sensores. Uma outra possibilidade é fazer o controle através da tensão do cabo que controla o deslocamento das falanges dos dedos. O sensor poderia estar localizado numa base próxima à palma da mão. Esse controle é interessante, pois os sensores ficam próximos ao local de aplicação das forças e após mecanismos com grande atrito como buchas, engrenagens e conduítes; assim as não linearidades são minimizadas e uma maior precisão na medição e na aplicação de forças é obtida. Neste trabalho se propõe um controlador cinestático simultâneo para força e posição, que trata o problema do controle dos dedos, não individualmente, mas como um conjunto cooperativo de dedos. Implementa-se também um controle híbrido de força e posição utilizando a metodologia tradicional. Na figura 7.1.1, a seguir, aparece o protótipo da

GAUSP (Garra Antropomórfica da USP), que foi construído para auxiliar no desenvolvimento da pesquisa e futuramente na validação dos dados obtidos pelos cálculos e simulação computacional, através de testes reais.

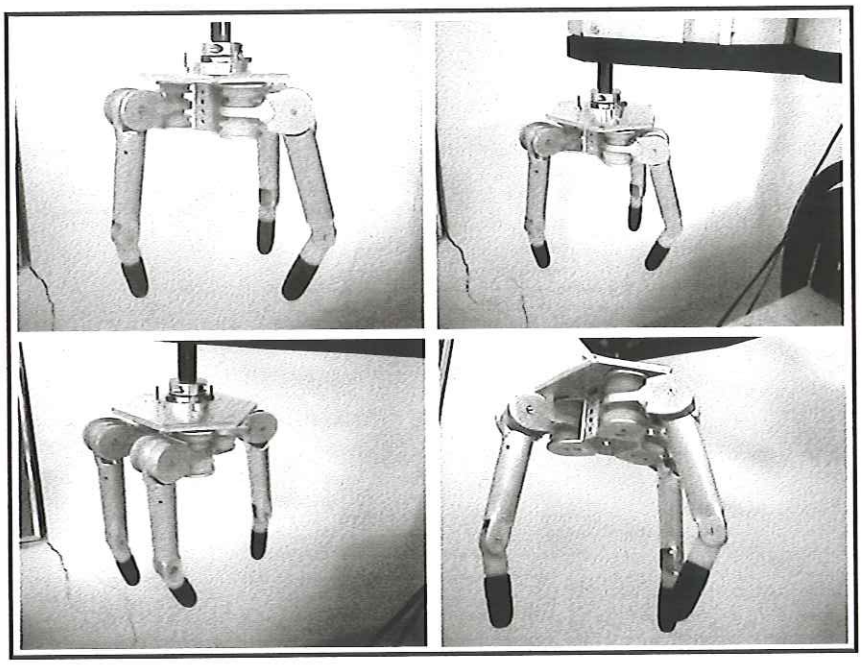


Fig. 7.1.1 Fotos do Protótipo da GAUSP (Garra Antropomórfica da USP), no Robô Scara.

Da foto acima pode-se formular um problema de controle de uma mão (garra) de 3 dedos com 3 graus de liberdade cada um. Sabe-se do capítulo 4 que são necessários n + 1 atuadores para controlar n graus de liberdade, já que aqui trabalha-se com atuação por cabos e estes devem estar sempre tensionados. O que nesse caso implicaria em 10 cabos atuadores, no mínimo, para que as 9 juntas sejam acionadas. No entanto, isso requer que cada junta seja acoplada às outras 8 juntas. Para reduzir estes acoplamentos, cada dedo é acionado por 4 cabos. Isso permite o controle de cada dedo independentemente, um menor número de peças diferentes, reduzindo assim os custos e possibilitando a fácil adição de mais dedos, se desejado.

7.2 Controlador Cinestático Simultâneo Para Força e Posição

Para elaborar um bom controle para os 3 dedos trabalhando de forma cooperativa, deve-se especificar 3 parâmetros de fixação. Por exemplo, o comportamento da rigidez entre os dedos que mantém a força de fixação sobre o objeto. Assumindo certos pontos de fixação, essa pega pode ser expressa como uma matriz G^{-T}, 9 x 9, que relaciona as forças da extremidade dos dedos com as forças externas aplicadas sobre o objeto e as forças internas oriundas da pega.

Para controlar concomitantemente os 3 dedos, deve-se inverter a matriz G^{-T}, obtendo :

$$\underline{F} = G^T \underline{\mathcal{F}} \tag{7.2.1}$$

Pode-se descrever o comportamento da rigidez generalizada como :

$$\underline{\mathcal{F}} = K_x \delta \underline{\mathcal{X}} \tag{7.2.2}$$

Para pequenos deslocamentos e trabalhos virtuais, tem-se :

$$\delta \underline{x} = G^{-1} \delta \underline{\mathcal{X}} \tag{7.2.3}$$

Onde:

K_x = matriz de rigidez (9 x 9)

$\delta \underline{\mathcal{X}}$= vetor de pequenos deslocamentos do objeto e pontos de contato

$\delta \underline{x}$ = vetor de pequenos deslocamentos das extremidades dos dedos

De 7.2.1, 7.2.2 e 7.2.3, tem-se:

$$\underline{F} = G^T K_x G \delta \underline{x} \tag{7.2.4}$$

Baseado na equação anterior (7.2.4) propõe-se o seguinte controlador simultâneo para força e posição :

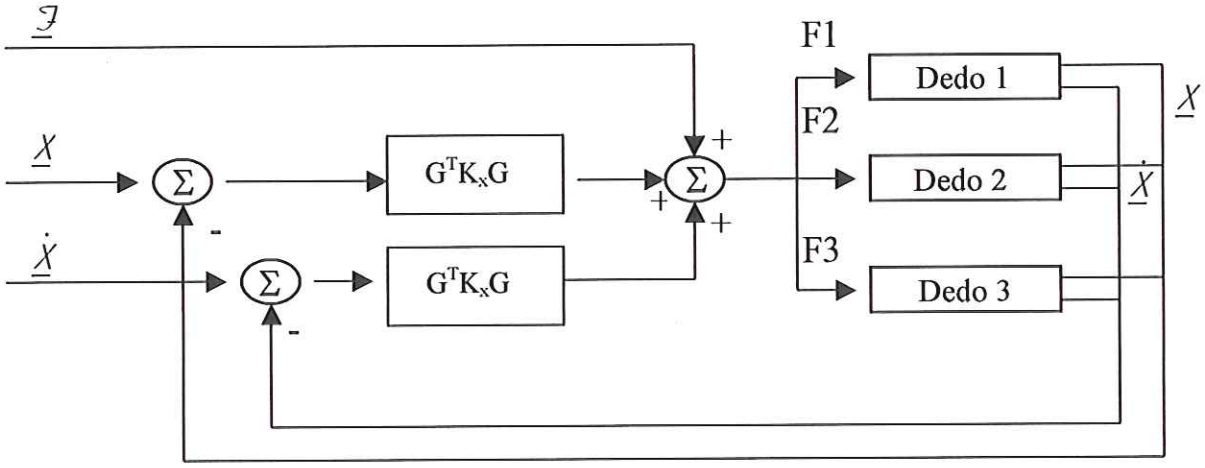


Figura 7.2.1 – Controlador Cinestático Simultâneo de Força e Posição

No controlador acima, todas as entradas e saídas são vetores (9 x 1). Observa-se que não há nenhuma solução cinemática inversa ou Jacobiana, o que permite um menor esforço computacional facilitando o controle em tempo real. As entradas são posições desejadas para as extremidades dos dedos, que podem ser calculadas (se necessário) através das matrizes de transformação aplicadas à posição do objeto; e as forças nas extremidades dos dedos.

Com o controlador proposto, espera-se um fino controle de força e posição para tarefas de montagem, por exemplo.

7.3 Controlador Híbrido, Força/Posição, Tratamento Clássico

No esquema a seguir, fig.7.3.1, encontra-se o controlador híbrido para o controle de força e posição de um dedo com 3 articulações, proposto por CRAIG (1989), o qual ainda é utilizado, porém criticado por não atuar de forma constante a cada funcionamento, portanto não confiável.

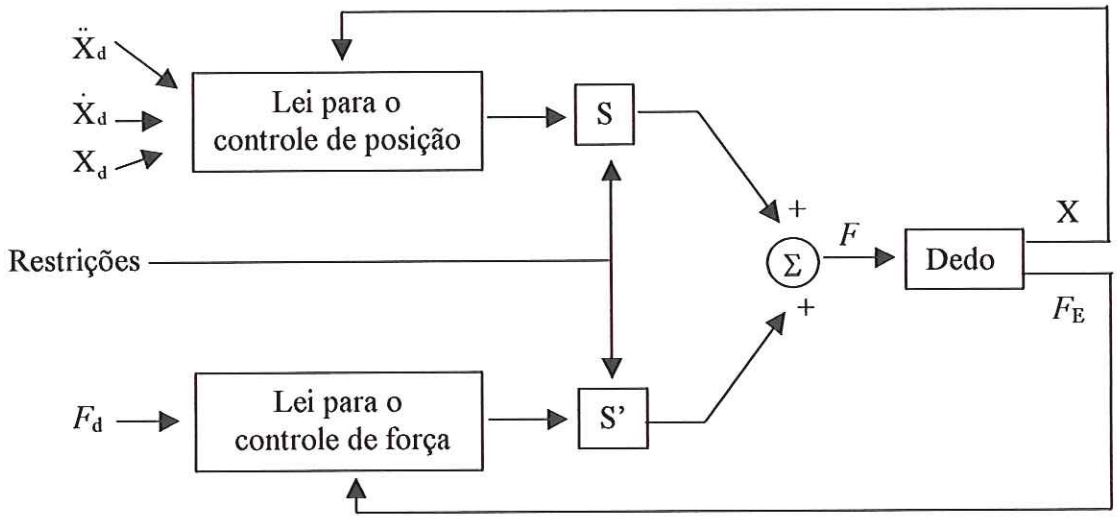


Figura 7.3.1 – Controlador Clássico Híbrido, Força/Posição

No controlador acima as matrizes S e S' foram introduzidas para abilitar o modo, posição ou força, que é usado para controlar cada junta do dedo em determinado instante. A matriz S é uma matriz diagonal com zeros e uns na diagonal principal. Quando 1 está presente em S, 0 está presente em S' e o controle de posição é quem está atuando neste instante, caso contrário, o controle da força é que estaria atuando. Então a matriz S funciona como uma chave para selecionar qual grandeza está sendo controlada em determinado instante. Nota-se que o controle de força e posição não é concomitante. Há sempre 3 componentes sendo controladas. Quando determinados graus de liberdade estão sujeitos ao controle da força, o erro de posição é ignorado e vice-versa.

7.4 Simulação do Sistema de Controle Proposto

Há ao menos duas concepções para se realizar o projeto da GAUSP. Na primeira, desenvolve-se paralelamente os projetos mecânicos e de controle, testa-os separadamente e chega-se ao protótipo (fig. 7.4.1). A outra maneira é desenvolver o projeto mecânico, compartilhá-lo com o projeto de controle, obter um modelo virtual e daí desenvolver um protótipo (fig. 7.4.2). Essa foi a maneira escolhida neste

trabalho. Dessa forma pode-se obter resultados mais confiáveis graças a integração dos projetos, como ocorre na realidade.

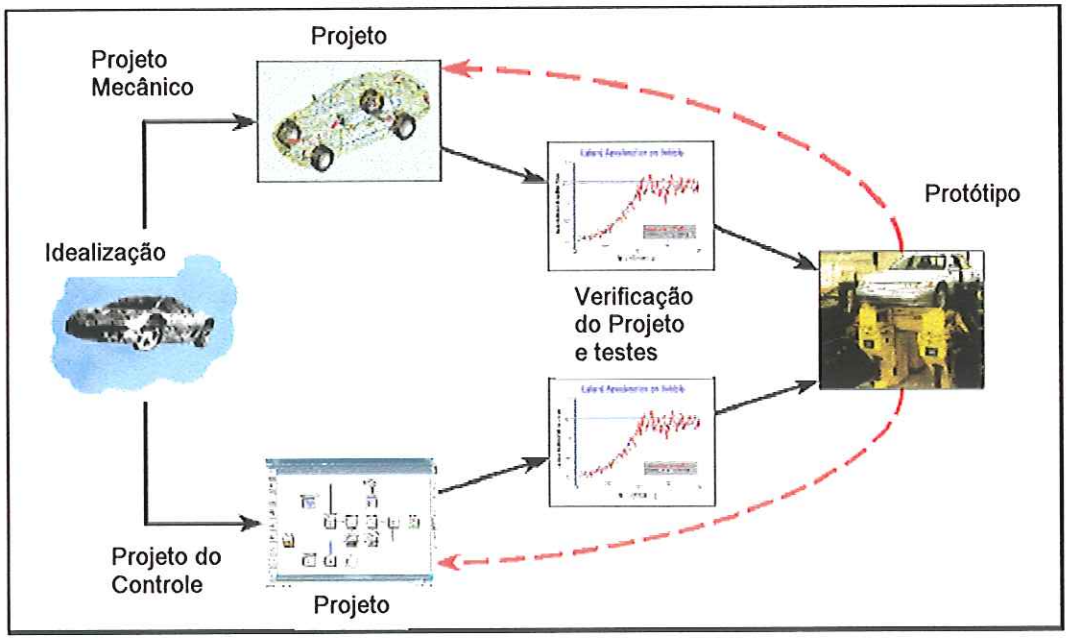


Figura 7.4.1 Desenvolvimento de Projeto Paralelo

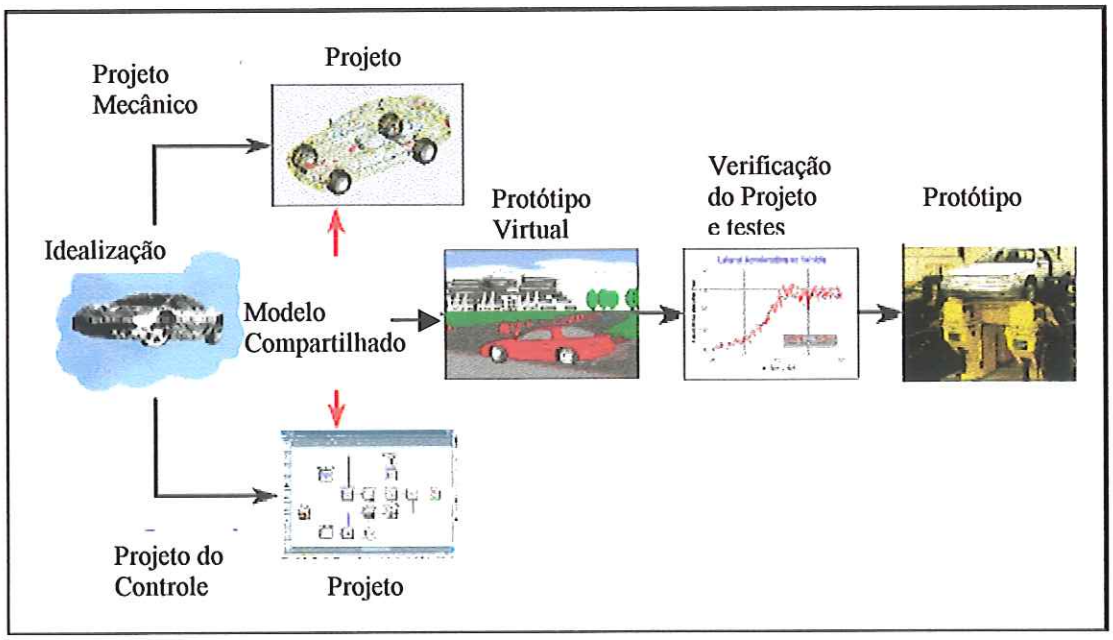


Figura 7.4.2 – Desenvolvimento de Projeto Integrado

Para a simulação do sistema de controle da GAUSP foi utilizado o aplicativo ADAMS®, programa para tratamento de sistemas multi-corpos, que fornece a planta do sistema. Sendo assim, não é necessário obter as equações de movimento dos dedos, uma vez que são geradas automaticamente. Os momentos de inércia são calculados em função do desenho e material de fabricação indicado. Porém, como o tratamento gráfico no ADAMS® ainda não é muito amigável, o desenho da garra foi elaborado respeitando-se somente as dimensões dos dedos e da base, uma forma aproximada (fig.7.4.3).

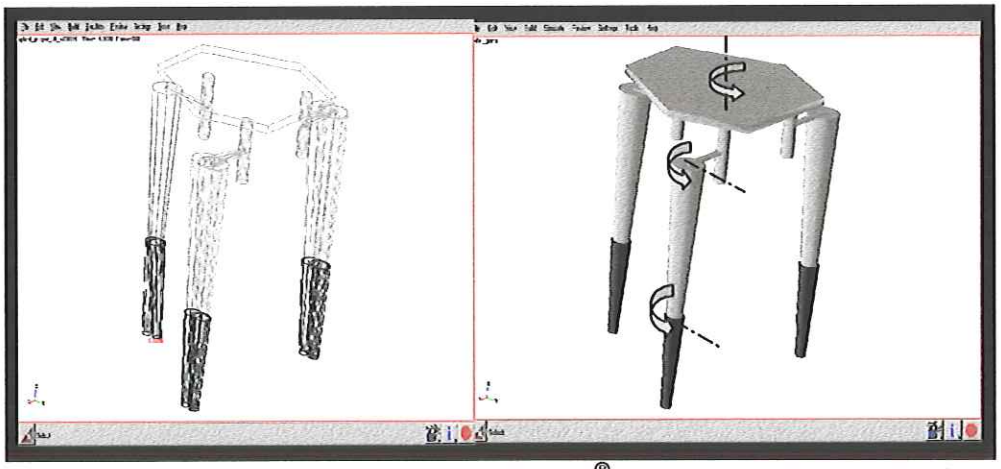


Figura 7.4.3 – GAUSP Representada no ADAMS® – Movimento Durante Simulação e Graus de Liberdade de um Dedo, Respectivamente.

Desse modo, as equações de movimento geradas não representariam de forma fiel a realidade. Para solucionar esse problema, o desenho de cada parte dos dedos, que são 3, foi elaborado no ProEngineer®, de onde foi captada a informação do momento de inércia. Esta informação, então, é introduzida no ADAMS® e aceita por ele para os cálculos. Para fins de controle utiliza-se o ADAMS® da maneira descrita a seguir, em 4 passos :

1. Construção do Modelo : O primeiro passo é construir o modelo utilizando o ADAMS®. Esse modelo deve ser completo e incluir toda geometria necessária, restrições, forças, e suas cotas.

2. Identificar as saídas e entradas do ADAMS® (fig.7.4.4): As saídas do ADAMS® são as entradas do aplicativo usado para elaborar o controle (no caso deste

trabalho, o Matlab®/Simulink). As entradas do ADAMS® são as variáveis que retornam do aplicativo de controle. Todas as entradas devem ser variáveis, já as saídas podem ser variáveis ou medidas.

3. Construção do Diagrama de Blocos: Neste terceiro passo deve ser construído o sistema de controle na forma de diagrama de blocos utilizando um dos aplicativos compatíveis com o ADAMS®: EASY5®, MATLAB® ou MATRIX®. Neste diagrama o bloco da planta (ADAMS®) deve ser incluso.

4. Simulação do modelo: Este é o quarto e último passo, onde serão feitas as simulações combinadas do modelo mecânico (planta) e do sistema de controle.

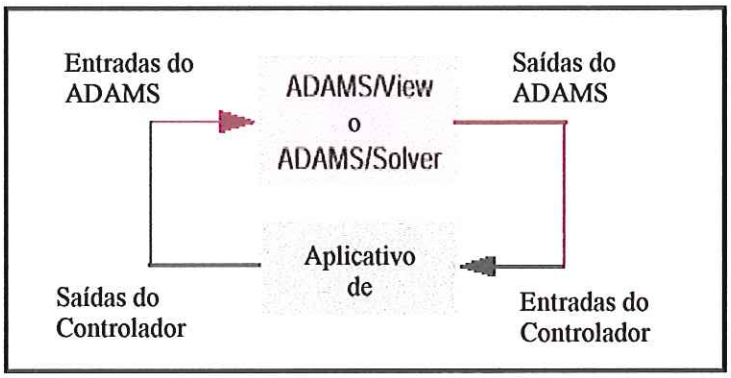


Figura 7.4.4 – Entradas e Saídas do ADAMS® e Aplicativo de Controle

A seguir, tem-se um resumo (fig.7.4.5) destes quatro passos usados para integrar o sistema mecânico ao sistema controle.

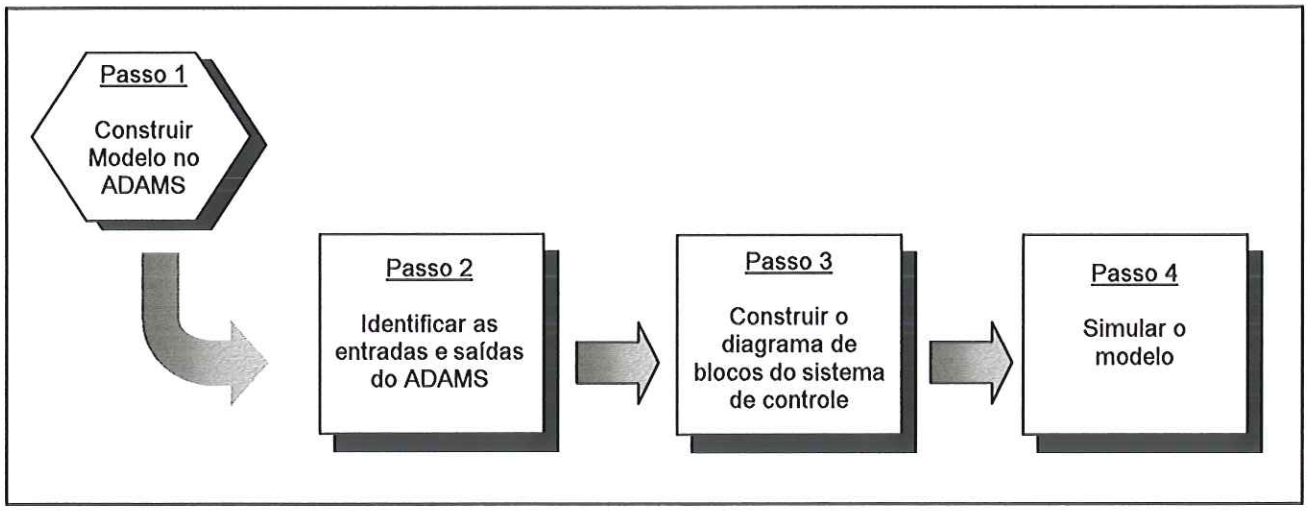


Figura 7.4.5 – Integração do Sistema Mecânico com o Sistema de Controle

7.5 Simulação do Problema Objeto do Trabalho

O aplicativo utilizado para a realização do sistema de controle, neste trabalho, é Matlab®/Simulink em associação com o simulador da planta, o ADAMS®. Na figura 7.5.1 da página a seguir é possível ver o sistema principal de controle totalmente integrado com o ADAMS®, que é representado pelo bloco alaranjado, a planta do sistema. Esta figura representa o controle utilizado neste trabalho (é a tela do Matlab®), onde é possível verificar a aplicação das descrições do item anterior, 7.4.

Na figura 7.5.2 são apresentadas várias vistas do modelo da garra com suas restrições, forças e forma; lembrando que o ProEngineer® foi utilizado para prover o ADAMS® das informações diretamente ligadas à forma.

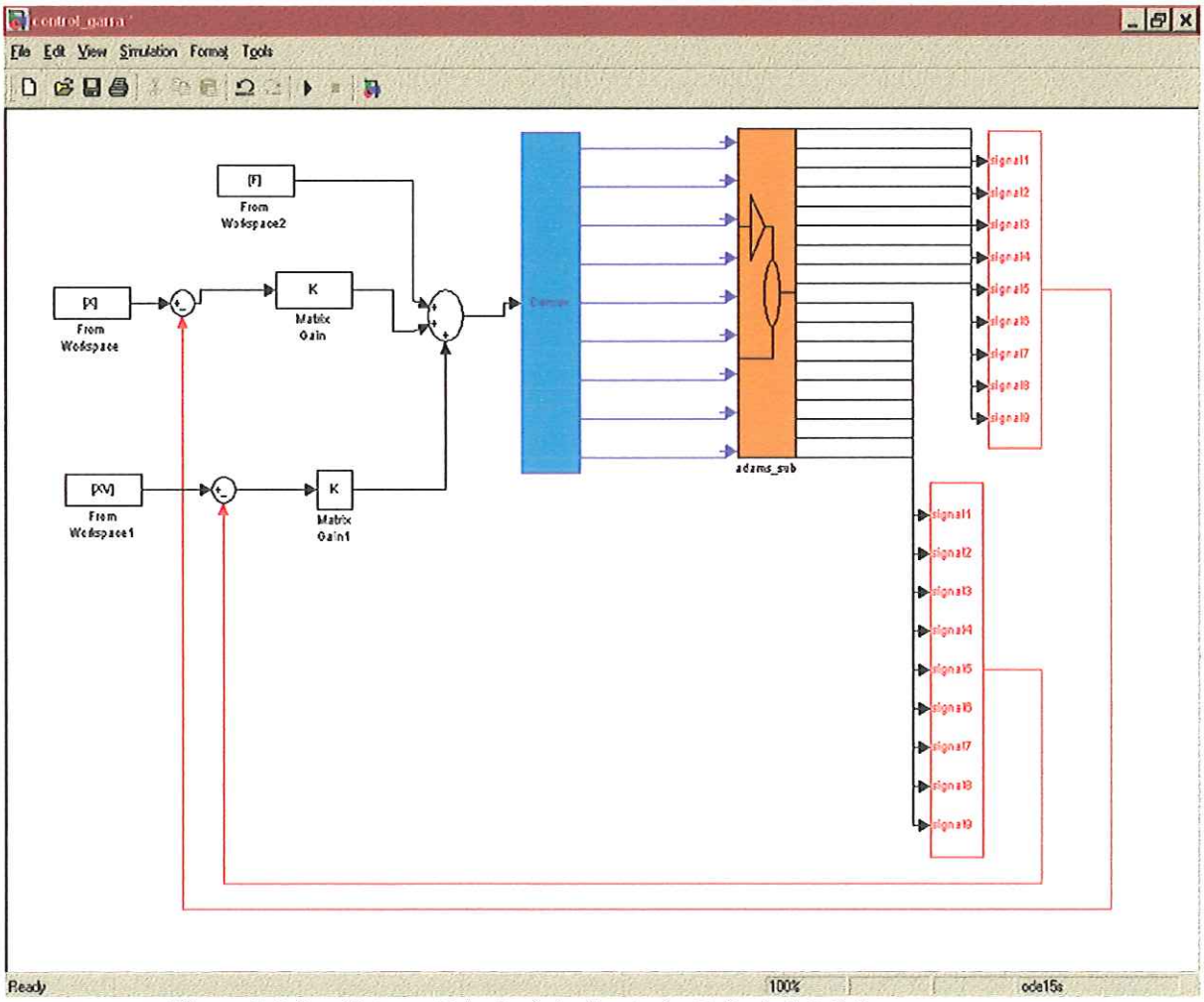


Figura 7.5.1 – Sistema Principal de Controle, Tela do Matlab.

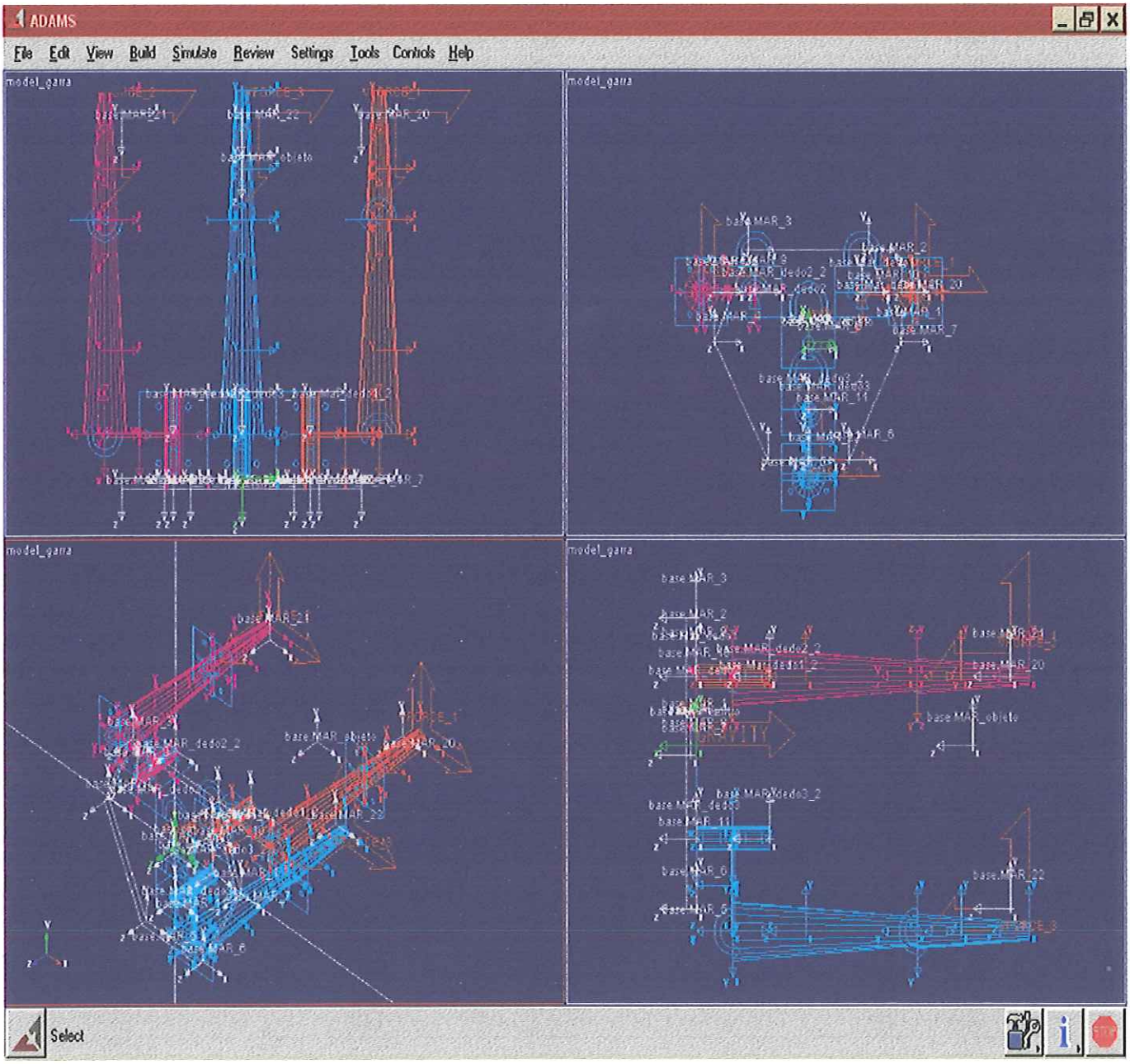


Figura 7.5.2 – Modelo Mecânico da GAUSP no ADAMS® com suas Restrições

8. TESTES E RESULTADOS

8.1. Introdução

Para a validação do sistema de controle, é proposto neste capítulo uma tarefa a ser realizada pela GAUSP. A aproximação algébrica vista no capítulo 4 para uma garra de dois dedos será agora aplicada para três dedos, um problema mais complexo. Com as equações do controlador aqui desenvolvidas é possível a implementação da simulação computacional mostrada no capítulo anterior. Ainda neste capítulo são apresentados e comentados os resultados das simulações.

8.2. Experimento

O problema ilustrativo que é proposto para realização do experimento é a pega de um objeto elíptico tridimensional pela GAUSP. A posição de cada contato no referencial inercial da base dos dedos (palma da garra) é : dedo 1, (x,y,z); dedo 2, (x,y,z) e dedo 3, (x,y,z).

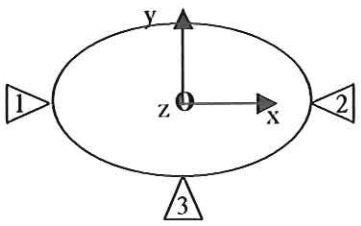


Figura 8.2.1 Modelo do Objeto Sendo Restrito Pelos Dedos

8.3. Aproximação Algébrica do Problema para Teste

Primeiramente deve-se identificar quantas e quais forças generalizadas (*wrenches*) estão agindo sobre o objeto. Sabe-se, pelo tipo de contato (fig.4.2.1 do capítulo 4), que são 9 e dispostos como ilustra a figura 8.3.1, abaixo.

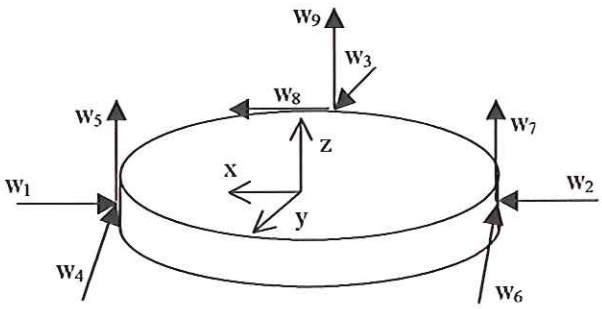


Figura 8.3.1 - *Wrenches* Aplicados no Objeto por 3 Pontos de Contato com Atrito

Assim a matriz W será :

$$W = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & -1 & 0 \end{bmatrix} \qquad (8.3.1)$$

E as soluções homogênias :

$$c_h = [\lambda_1(1, 1, 0 , 0, 0, 0, 0, 0, 0) + \lambda_2(0, -1, 1, 1, 0, 0, 0, -1, 0) + (0, 1, 1, 0, 0, 1, 0, 1, 0)]\ \lambda_3 \qquad (8.3.2)$$

Como neste caso particular q = 3 e p = 2, os primeiros p elementos de $\underline{c}$ podem ser considerados positivos, pois q ≥ p e os p primeiros elementos dos q $\underline{c}_{i,h}$ são linearmente independentes. Além disso pode-se fazer a análise das desigualdades para se arbitrar os valores convinientes dos λ_i. Sendo assim, pode-se garantir que o objeto será restrito por esta pega e obtém-se a matriz G^{-T}:

$$G^{-T} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & -1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \qquad (8.3.3)$$

Assim com a matriz G^{-T} pode-se parametrizar o problema e com as matrizes de rigidez K_x (N/mm) e K_v(N/mm), que são diagonais, o controlador fica descrito. As entradas de força (N), posição (mm) e velocidade (mm/s) são vetores de 9 componentes fornecidos no início do controle.

8.4. Resultados

Nesta seção são apresentados e discutidos os resultados da simulação do problema proposto na seção anterior. Foram feitos testes para verificar o controle da força aplicada pelas extremidades dos dedos e suas posições.

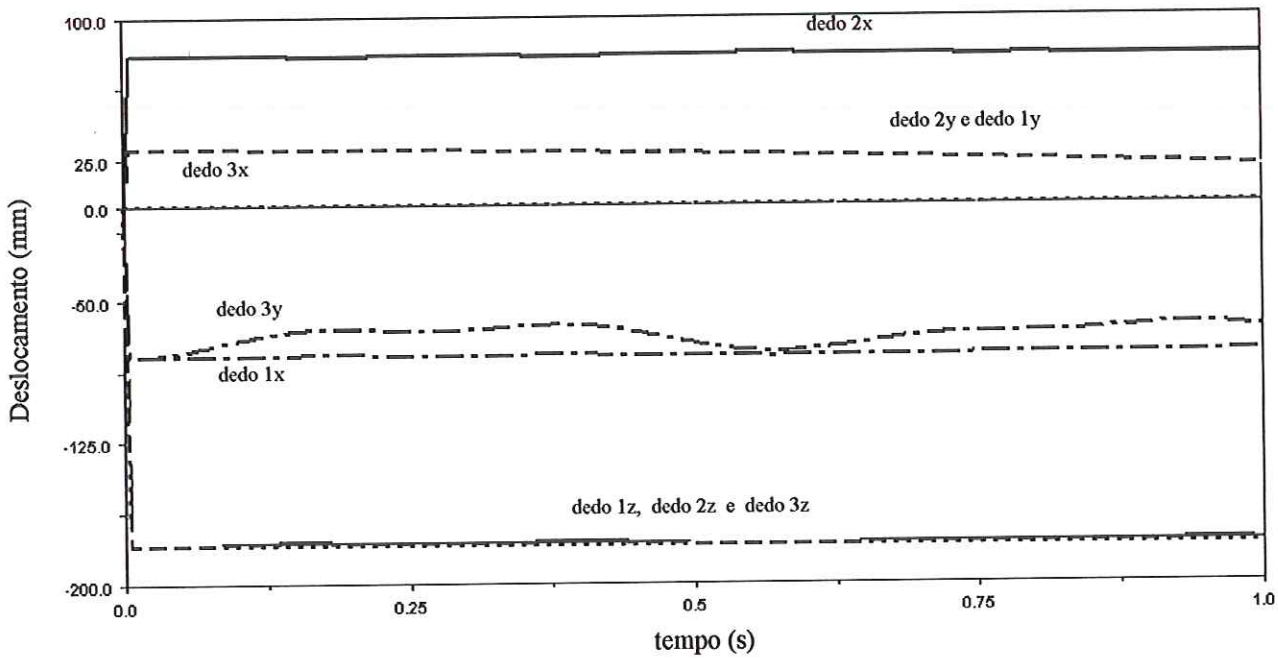


Figura 8.4.1 – Deslocamento das Extremidades dos Dedos

Na figura acima quando se lê "dedo 1x", por exemplo, deve-se entender que a função, no caso deslocamento, ocorre na extremidade do dedo 1 na direção x. Na mesma figura (8.4.1) as posições que devem ser mantidas pelas extremidades dos dedos são:

Dedo 1 (-78,30,-178)

Dedo 2 (78,30,-178)

Dedo 3 (0,-78,-178)

Observa-se na figura acima que as posições equivalentes as forças internas, ou seja, posições que não devem variar negativamente (inverter o sentido de atuação) ficaram estáveis. Estas posições são as do dedo 1 na direção x e a do dedo 2 na direção x, o que demonstra que a pega está segura sem o perigo do objeto escorregar. O dedo 3 na posição y ficou instável , pois foi considerado na formulação da matriz G que esta direção não era essencial para haver uma pega segura. Para contornar este problema deve-se arbitrar forças internas relativas a essa posição, que sejam suficientemente grandes para impedir a oscilação e sua influência nas outras componentes da direção y. Este acréscimo de força seria somente um problema caso a estrutura do objeto a ser pego não a suportasse. As demais posições mantiveram-se

de forma satisfatória. Várias simulações foram implementadas chegando-se na maioria das vezes em resultados próximos ao exibido pela figura 8.4.1.

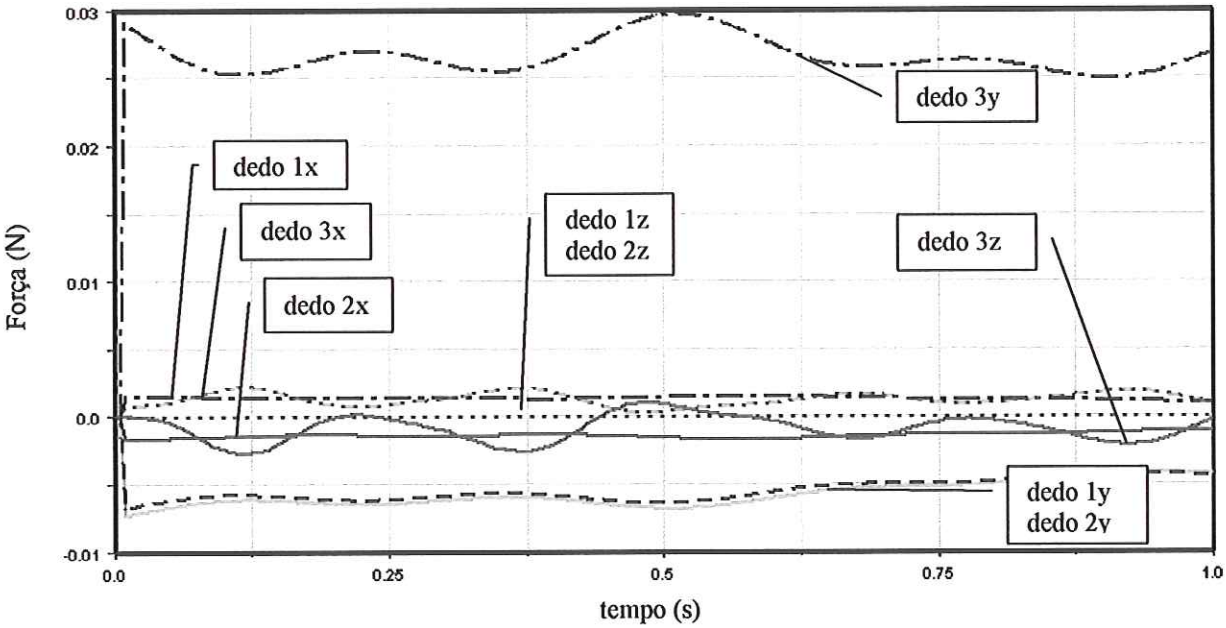


Figura 8.4.2 – Forças na Extremidade dos Dedos

Novamente as forças que devem ser contrárias e iguais (forças internas) referentes a 1x e 2x mantiveram-se estáveis de mesmo módulo mas em sentido oposto, como desejado. As forças referentes a 1y e 2y, somadas, devem ser contrárias e de igual magnitude a 3y para que o equilíbrio seja mantido nesta direção. Esse comportamento é notado no gráfico porém ainda existem diferenças entre as magnitudes. Ainda ocorrem instabilidades no controle o que deve ser corrido em termos do controlador especialmente na forma de se arbitrar valores para forças internas e na obtenção de valores mais reais para as matrizes de rigidez. No entanto este controlador foi utilizado para diferentes tipos de corpos sem a necessidade de ser otimizado para cada um.

9. CONCLUSÕES, OBSERVAÇÕES FINAIS E TRABALHOS FUTUROS

9.1. Conclusões

Durante o trabalho para o desenvolvimento de um controlador de força e posição, houve a necessidade de se desenvolver estudos estáticos e cinemáticos para que se pudesse trabalhar num ambiente em que a mudança de parâmetros de um dos elementos (dedos) influi em todo o conjunto no processo de pega. Foi necessário estudar como os contatos funcionam e como influenciam nas forças generalizadas, levando ao estudo de cada um dos tipos de contatos. A análise das restrições, como ocorrem, quando e como verificar sua existência ou não, receberam grande atenção no trabalho. Foi realizado o estudo do deslocamento de corpos rígidos concluindo-se que para este fim a Teoria Helicoidal seria mais apropriada.

Por fim, foi estudada a matriz de transformação G para manipulação em cadeias fechadas, bem como a matriz Jacobiana, J, para manipulação em cadeia aberta, assim pôde-se obter as relações básicas necessárias para se desenvolver o controlador. Foram desenvolvidas relações importantes que se aplicam, não somente a garras de dois e três dedos, mas também a garras com maior ou menor número de dedos (ou braços). Além de garras, utiliza-se essa teoria para o estudo de robôs que trabalham de forma cooperativa. Assim, fica explícito o caráter genérico desta abordagem. Observa-se então que foram estabelecidos fundamentos matemáticos para o uso de garras antropomórficas e robôs cooperativos para execução de manipulações. Quanto ao controlador, demonstrou ser capaz e adequado ao controle de pequenos deslocamentos e forças aplicadas a tarefas de ajuste, por exemplo. É flexível e adaptavel a várias situações diferentes.

9.2. Observações Finais e Trabalhos Futuros

Este trabalho está inserido num grande projeto que visa obter um robô capaz de indentificar objetos, pegá-los e manipulá-los de forma habilidosa. A teoria hora abordada, como é a base da manipulação, permite um grande avanço nas pesquisas do laboratório, não somente dentro deste projeto da GAUSP, mas em projetos futuros. Para o controlador poderá ser desenvolvido ainda um sistema complementar ao sistema de recálculo da matriz G (vide capítulo 5) de acordo com a mudança de pontos de fixação estabelecida pelo robô, e de novas intensidades de forças internas arbitradas. Trabalho que exige que seja recalculada a matriz W (vide capítulo 4) e seus autovetores e que seja feita a análise de restrição do objeto. Os valores empíricos das matrizes de rigidez (K_x e K_v, vide capítulo 7) devem ser mais explorados, o que garantirá maior fidelidade ao controlador proposto. Ainda poderão ser implantados no controlador mais alguns blocos, agora mais dedicados, para que os atuadores possam estar exercendo torques nas juntas e obter as mesmas respostas que obteve-se neste trabalho, no qual as atuações foram consideradas diretamente como forças na extremidade dos dedos. Trabalhos teóricos e experimentais no aprimoramento da matriz G para o controle são essenciais, visto que trarão ao laboratório o domínio pleno da nova teoria e os resultados práticos. O estudo do centro de rigidez e a consideração dele com relação aos pontos de contato devem ser realizados, o que deve melhorar sensivelmente o desempenho da matriz G e conseqüentemente do controlador como um todo. A implementação do controlador no protótipo da GAUSP é sem dúvida o trabalho mais esperado, o qual passa a ser exeqüível após o desenvolvimento deste trabalho. Embora recomenda-se ainda uma otimização do controlador, chama-se a atenção para o fato do mesmo estar funcionado para a pega de vários corpos diferentes sem a necessidade de otimização para cada um deles, tornando-o assim flexível e viabilizando o seu uso para diversas tarefas. Todos estes trabalhos aliados levarão certamente a uma conclusão do projeto total. Incluindo-se os trabalhos em andamento, como o do estudo mecânico da GAUSP, que visa otimizar a atuação da garra trabalhando por exemplo sobre a região de pontos *isotrópicos*, onde o manipulador exerce forças com menor erro

possível e o de sensoriamento da garra e do elemento de comparação (elemento padrão com extensômetros, para simples conferência da força aplicada).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMADEUS PROJECT HOMEPAGE. (1999) http://www.cee.hw.ac.uk/oceans/projects/ amadeus/ amadeus.htm. (6 April)

BALL, R.S.(1900). *A Tretise on the theory of screws.* Inglaterra, Cambridge University Press

CAURIN, G.A.P.(1993). Friction compensation in the position control of robots with disturbance observer. IN: PAN AMERICAN CONGRESS OF APPLIED MECHANICS, 3., São Paulo, 1993. *Proceedings.* São Paulo, pág. 459-462.

CRAIG, J.J. (1989). *Introduction to robotics : mechanical and control.* EUA, Addison-Wesley

DELFT OUTLOOK 97.2 (1997) /Catálogo/ Delft University Press.

DLR ARTICULATED HAND.(1999). http://www.robotic.dlr.de/MECHATRONICS/DFG/ ver_apr97.html. (6 April)

GOLDBERG, K.;HALPERIN, D.;LATOMBE, J.C.; WILSON, R. (1995). *Algorithmic foundations of robotics.* Massachusetts-EUA, AK Peters

LAKSHMIRNARAYANA, K. (1978). *Mechanics of form closure* . ASME Paper No. 78 – DET - 32

MASON, M.T. (2000). *Mechanics of robotic manipulation.* EUA, MIT press

MURRAY, R. M. ; LI, Z.; SATARY, S. S. (1994). *A Mathematical introduction to robotic manipulation.* Inglaterra,CRC Press.

O'BRIEN, D. J.; LANE, D. M. (1998). *Force and slip sensing for a dextrous underwater gripper*. http://www.cee.hw.ac.uk/oceans. (11 December)

OHWOVORIOLE, M.S. (1980). *An extension of screw theory and its applications to the automation of industrial assemblies*. EUA, Stanford Press

OKAMURA, A. M.; SMABY, N. ; CUTKOSKY, M. R. (2000). An overview of dexterous manipulation. IN: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON ROBOTICS AND AUTOMATION, Japão, 2000. *Proceedings. Tóquio.*

PAUL, R.L.; WU, C. H. (1980) Manipulator compliance based on joint torque control. IN: IEEE CONFERENCE ON DECISION AND CONTROL, EUA, 1980. *Proceedings*. Albuquerque.

PHILLIPS, J. (1984). *Fredom in machinery*. Inglaterra, , Cambridge University Press. v

POINSOT,L. (1848). *Elements of statics*. 9. ed. Paris, Bachelier

RAIBERT, M. H.; CRAIG, J.J.(1980). Hybrid position/force control of manipulators. IN: ASME WINTER ANNUAL MEETING, EUA, 1980. REULEAUX, F. (1963), *The kinematics of machinery*. Inglaterra, Dover Publications

SALISBURY, J.K. (1980). *Active stiffness control of manipulator in cartesian coordinates*. IEEE, CONFERENCE ON DECISION AND CONTROL, EUA, 1980. *Proceedings*. Albuquerque.

SALISBURY, J.K. (1982). *Kinematic and force analysis of articulated hands*. Stanford. 97p. Dissertation (Thesis) - Stanford University.

SOUTHAMPTON ARTIFICIAL HAND (1999). http://www.soton.ac.uk/~eewww/ Arthand.htm. (6 April)

STRANG, G. (1976). *Linear algebra and its applications*. EUA, Academic Press.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTAR

ADAMS REFERENCE MANUAL (1998). Mechanical dynamics, version 10.0, EUA

ARKIN, R.C. (1999). *Behavior-based robotics.* , 2 ed , EUA, Massachussetts Institute of Technology Press.

BUSS,M.; FAYBUSOVICH,L.;MOORE, J.B.; (1998). Dikin-Type algorithms for dextrous grasping force optimization. *International Journal for Robotics Research*; vol 1 , n.8 .

MONTANA, D.J. (1988). *The kinematics of contact and grasp.* THE INTERNATIONAL JOURNAL OF ROBOTICS RESEARCH, vol.7, n.3.

DUHAUT, D.; LAVAREC, E.; MATEO, E.; MONTILLET, D. (2000). *Applications non manufacturières de la robotique.* Hermès, Université Montpellier. Chapitre 7

FRANKLIN,G.F.; POWELL,J.D.; NAEINI,A.E.(1994). *Feedback control of dynamic systems.* EUA, Addison-Wesley

HAN, H.Y.; KAWAMURO,S. (1999) *Stiffness of human fingertip and comparison with artificial fingers.* IEEE TRANSACTIONS ON ROBOTICS AND AUTOMATION,vol 21, n.2.

KAWASAKI,H.; ET AL. (1999). *Dextrous anthropomorphic robot hand with distributed tactile sensor: Gifu Hand II.* IEEE TRANSACTIONS ON ROBOTICS AND AUTOMATION,vol 21, n.2.

KRYSZIG,E. (1993). *Advanced engineering mathematics.* EUA, John Wiley & Sons

LAUISONS, T.; (1997) *Algebra linear.* Trad. por Elza F. Gomide. São Paulo, Edgard Blücher

LIEGEOIS A. (2000). Modélisation et comande des robots manipulateurs.*Techniques de l'Ingénieur*, article n° S7 730, Université Montpellier

MASON, M.T. ; SALISBURY, K. J.J. (1985). *Robot hands and the mechanics manipulation.* EUA, MIT Press

MCCARTHY, J. M. (1990). *Introduction to theoretical kinematics.* EUA, MIT Press

MCKERROW,P.J.(1995). *Introduction to robotics.* Austrália, Addison-Wesley

MIRSKY, L. (1990). *An Introduction to linear algebra.* EUA, Dover

MONTANA, D. J. (1988) The kinematics of contact and grasp. *International Journal of Robotics Research.* v.3 n.6

OGATA, K.(1982). *Engenharia de controle moderno.*Trad. por André F. Kohn e José Carlos T.B. Moraes. São Paulo, Prentice/Hall do Brasil

PFEIFER,F.(1996). *Grasping with hydraulic fingers – an example of mechatronics.* IEEE/ASME TRANSACTIONS ON MECHATRONICS, v.1, n. 2.

PHAM,D.T.; HEIGINBOTHAM,W.B. (1986) *Robot grippers.* Inglaterra, IFS.

READMAN, M. C. (1994). *Flexible joint robots.* Inglaterra, CRC Press

ROMDHANE,L.;DUFFY,J.J.; (1990). Kinematic analysis of multifingered grippers *International Journal of Robotics,* v. 9, n 3.

SIMUNOVIC, S. N. (1975) *Force information in assembly processes. IN:* INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON INDUSTRIAL ROBOTS, v5., n1, Japão,1975.

SOBRY, N. (2000) *Etude d'une pince manipulatrice á trois doigts. Mémoire de fin d'etudes.* Bélgica, Université Catholique de Louvain.

SVININ, M. M.; UEDA, K. ; KANEKO, M. (1999). On the Stability of an Object in Multi-Finger Grasp. IN: IROS – INTERNATIONAL CONFERENCE ON INTELLIGENT ROBOTS AND SYSTEMS. Korea, 1999. *Proceedings.* Kyongju ,v.1, p418.

VALENTE, C.M.O. (1999). *Fixação de objetos de formato geométrico desconhecido utilizando redes neurais artificiais.* 97 p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

YOSHIKAWA,T.; HARADAK.; MATSUMOTO, A. (1996) Hybrid position/force control of flexibel – macro/rigid-micro manipulator systems. IEEE TRANSACTIONS ON ROBOTICS AND AUTOMATION. v. 12, n.4, EUA

APÊNDICE 1

Garras

1. GARRAS

Aqui se encontra um breve "histórico" sobre garras industriais e garras antropomórficas OKAMURA (2000).

1.1. Garras Industriais

Normalmente as garras industriais possuem acionamento hidráulico ou pneumático e a configuração básica é de dois dedos paralelos ou angulares e de três dedos radiais na forma de castanha. Podemos observar estes tipos de garras na figura A.11.1. Existem desde garras em miniatura com 23mm de comprimento, força máxima por dedo de 1,7N e carga máxima recomendada de 18g (FIGURA- A.1 1.1.A), até garras de potência com 280mm de largura, força máxima por dedo de 5300N e carga máxima recomendada de 50Kg (FIGURA-A.1.1.1C). Porém a variedade de garras industriais ultrapassa estes limites em relação ao tamanho e a carga. Além do que, existem industrias especializadas na sua fabricação sob encomenda; geralmente são indústrias que já fabricam placas, do tipo castanha, para tornos.

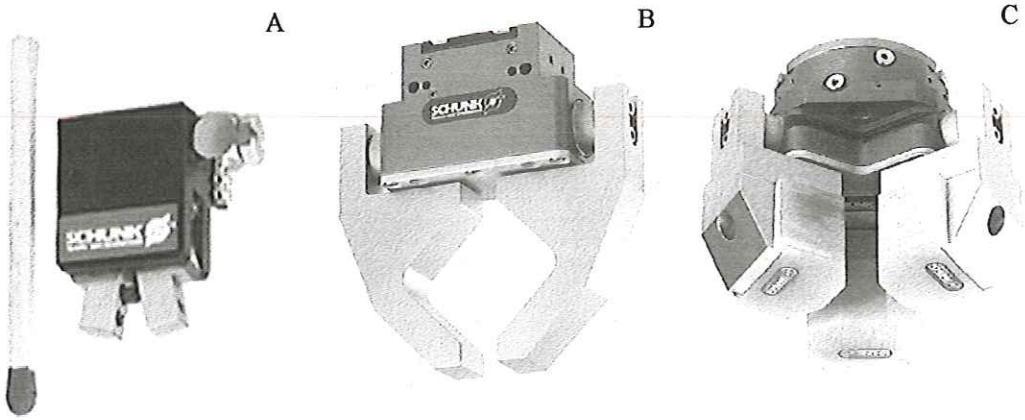


FIGURA- A.1.1.1 Tipos de garras industriais: (A) garra miniatura angular de dois dedos; (B) garra paralela de dois dedos; (C) garra de três dedos radiais em forma de castanha. Estas fotos foram retiradas do catálogo de dispositivos de fixação da SCHUNK PRECISION WORKHOLDING SYSTEMS (1998).

Existem vários tipos de dispositivos, alguns que possuem sensores de força posicionados na base dos dedos, permitindo a detecção de colisões e sobrecargas, porém não permitem o controle de força individual por dedo. Sem este controle, as garras industriais normalmente trabalham em malha aberta, utilizando a potência máxima de seus atuadores.

Existem também dispositivos especiais para montagem (FIGURA- A.1.1.2) que se caracterizam por uma baixa rigidez a esforços transversais, permitindo um certo deslocamento ou uma certa rotação da peça a ser montada, que desta forma se acomoda no alojamento (FIGURA – A.1.1.3). O ponto negativo e clássico, em virtude do tempo em que isto ocorre, é que cada dispositivo deve ser construído segundo dimensões específicas da peça.

FIGURA – A.1.1.2 – Dispositivo especial de montagem, caracterizado por uma pequena rigidez a esforços laterais.

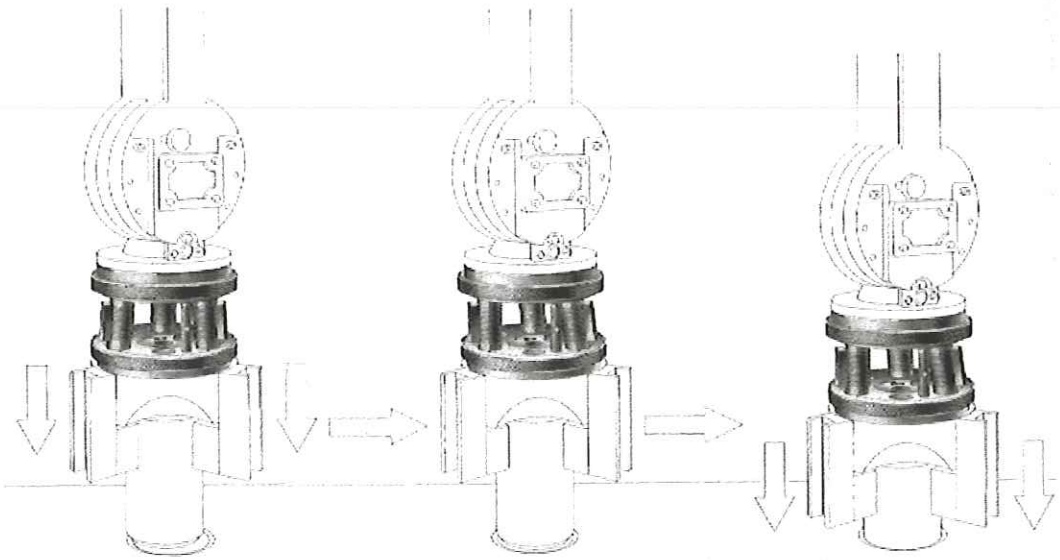


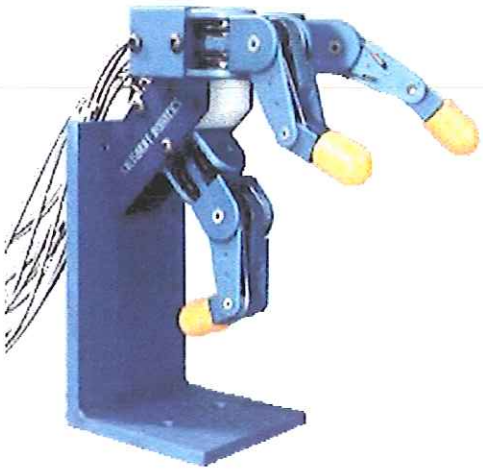
FIGURA - A1.1.3 – Processo de montagem, no qual é permitido um certo deslocamento ou uma certa rotação da peça a ser montada, que desta forma se acomoda no alojamento

1.2. Garras Antropomórficas

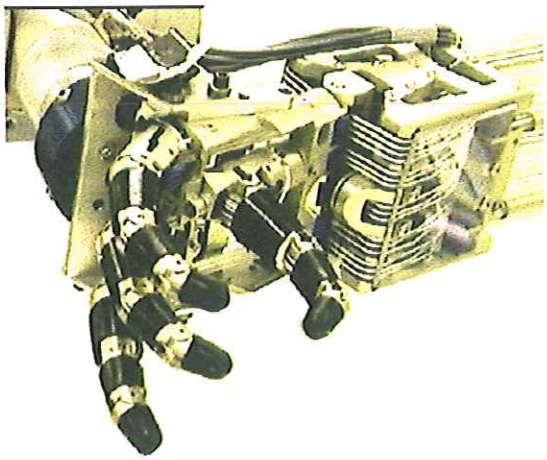
As garras antropomórficas estão sendo desenvolvidas para aumentar a flexibilidade e a eficiência das operações de manipulação. Este desenvolvimento se dá em torno de 20 anos e ainda procura-se uma garra flexível ideal e que venha a fazer parte de algoritmos robóticos. As principais garras foram desenvolvidas no Japão, Estados Unidos e na Europa, apresentando diversas configurações (número de dedos e graus de liberdade por dedo) e tipos de acionamento (elétrico, pneumático e hidráulico).

A seguir é realizada uma revisão dos principais trabalhos de pesquisa envolvendo garras com múltiplos dedos.

As primeiras foram desenvolvidas utilizando o princípio de atuação por cabo. Este princípio apresenta boa precisão de posicionamento, movimentos rápidos e possibilita uma redução do peso próprio da garra; porém, exige um bom controle e manutenção pois com o tempo podem surgir folgas. Os principais exemplos são as garras de STANFORD/JPL (1998) e UTAH/MIT (1998), apresentados na figura a seguir.



(A) Garra de STANFORD/JPL
3 dedos, 3 graus de liberdade por dedo
Acionada por 12 cabos revestidos com teflon
12 sensores de tensão do cabo



(B) Garra de UTAH/MIT
4 dedos, 4 graus de liberdade por dedo
Acionada por 32 tendões poliméricos
32 sensores de tensão do cabo

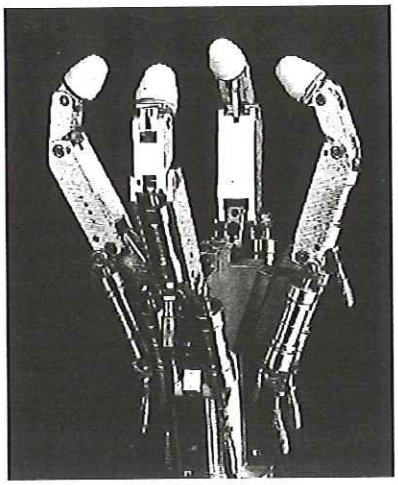
FIGURA-A.1.2.1 – Exemplos de garras acionadas por cabo

Buscando manter o baixo peso e evitar os problemas de montagem dos cabos, foram desenvolvidas garras hidráulicas e pneumáticas, sendo que esta última apresenta uma melhor relação peso/potência de atuação. Os compressores são colocados na base do robô e apenas as linhas de pressão são levadas até a garra. No entanto, o controle linear é complexo, há problemas de vedação (inclusive pela ação do tempo), a instalação é trabalhosa e o custo é expressivo. Para a garra do projeto *Advanced Manipulation for Underwater Sampling* –AMADEUS (1998), destinada a operações no fundo do mar, foi desenvolvido um novo sistema pneumático a fim de suportar as condições do ambiente proposto. Os sistemas de pistões convencionais estariam sujeitos a problemas de vedação, corrosão e sujeira.

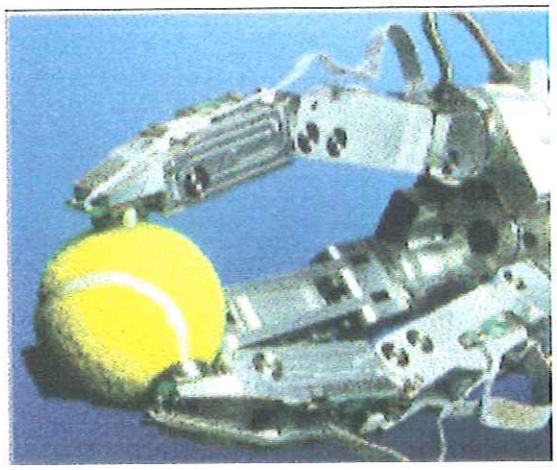
A garra desenvolvida na Technical University of Munich (MENZEL, 1994; PFEIFFER, 1996) é acionada hidraulicamente, através de quatro pistões montados no dedo (FIGURA- A.1.2.2.A). A garra desenvolvida na TU-Delft (JONGKIND, 1993; OVERDIJK, 1997) (FIGURA- A.1.2.2.B) apresenta um acionamento misto: pneumático, para o movimento das falanges; elétrico, para o movimento longitudinal dos dedos e hidráulico, para a rotação da palma. Esta garra fazia parte do projeto

TELEMAN (1998), que visava desenvolver um sistema de manipulação capaz de operar em centrais nucleares.

O desafio era vencer as condições de radioatividade, que inviabilizava a utilização de sensores com eletrônica ativa incorporada. Tornou-se necessário o desenvolvimento de sensores passivos (que não imitem sinal, apenas recebem a informação) de posição e sensores de tato que suportassem tais condições.



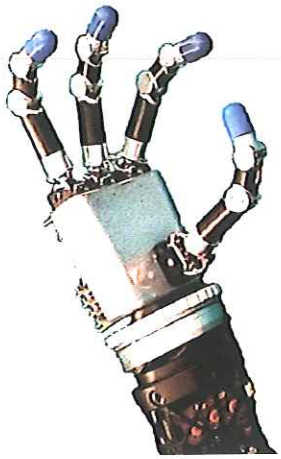
(A) LBM – Munique
4 dedos, 3 graus de liberdade por dedo
4 atuadores hidráulicos por dedo
Estrutura elástica na ponta dos dedos



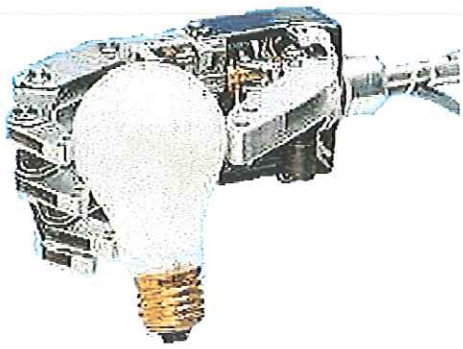
(B) DELFT
3 dedos, 3 graus de liberdade por dedo
Acionamento hidráulico e elétrico do dedo
Acionamento pneumático da palma giratória
6 sensores passivos de posição (LVDTs)
3 sensores matriciais de tato

FIGURA – A.1.2.2 – Exemplo de garras de acionamento hidráulico e pneumático.

A FIGURA- A.1.2.3A apresenta a garra desenvolvida no DLR (HIRZINGER, 1993; DLR ARTICULATED HAND, 1998), que representa um dos mais complexos sistemas de manipulação já construídos. Esta garra foi implementada para substituir as limitadas garras de dois dedos ainda utilizadas nos ônibus espaciais americanos. Com o objetivo de permitir manipulações mais complexas, ela impressiona pela configuração de quatro dedos, doze graus de liberdade e principalmente vinte e cinco sensores por dedo, incluindo sensores de força, posição e temperatura, além de uma pequena câmara instalada na palma da mão. Outra importante característica é que todo o sistema de acionamento está integrado junto à palma ou diretamente aos dedos, sem aumentar demasiadamente o peso próprio da garra (1,8 Kg).



(A) Garra DLR
4 dedos, 3 graus de liberdade por dedo
Acionamento (acoplado à palma)
25 sensores por dedo (tato, temperatura, força)



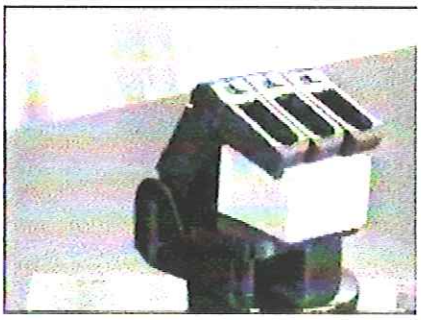
(B) Prótese de mão de Southampton
5 dedos, 4 graus de liberdade totais
Atuadores, sensores e eletrônica incorporada
Baixo consumo de energia

FIGURA – A1.2.3 – Foto de duas das mais avançadas garras antropomórficas já construídas

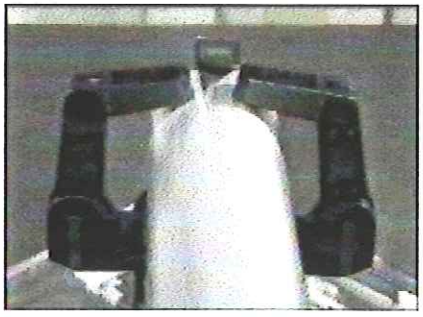
A FIGURA- A.1.2.3B apresenta a garra desenvolvida na Universidade de Southampton (SOUTHAMPTON ARTIFICIAL HAND, 1998), que segue uma outra filosofia de aplicação: o ramo de próteses de mão. Este ramo apresenta alguns pontos críticos como tamanho, peso, consumo dos atuadores e, principalmente, interface homem - máquina. O cérebro utiliza uma vasta quantidade de informações provindas da mão (tato, temperatura, força,...) para controlar os reflexos musculares e permitir uma fixação segura. As mãos artificiais não conseguem estabelecer esta interface e trabalham sem qualquer realimentação. Devido a estes empecilhos, as atuais próteses comerciais são extremamente limitadas, se restringindo ao movimento de pinça entre os dedos e o polegar e apresentando baixa capacidade de evitar o escorregamento do objeto fixado. Neste contexto, a mais avançada prótese de mão foi desenvolvida em Southampton para aumentar a capacidade de manipulação dos sistemas artificiais. Dotada de cinco dedos e quatro graus de liberdade, a prótese inteligente de Southampton utiliza sensores de força e tecnologia micro processada para se auto - ajustar aos parâmetros de fixação e evitar escorregamentos.

Mais recentemente, a empresa americana Barrett Technology Inc. desenvolveu uma das primeiras garras com real potencial para aplicações industriais. A BarrettHand (TOWNSEND, 1999) apresenta uma arquitetura compacta, leve

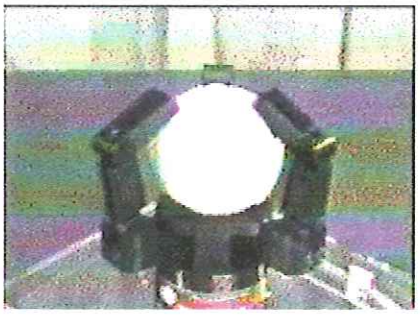
(1,18Kg) e totalmente integrada, de forma que todos os dispositivos mecânicos e eletrônicos são montados na sua base. Esta garra foi implementada numa configuração de três dedos, um com dois graus de liberdade e dois com três graus de liberdade, que propciam a movimentação lateral. Tal mobilidade adicional possibilita que a garra assuma diversas configurações de fixação. Contudo, apenas quatro motores são responsáveis pelo acionamento de todos oito graus de liberdade, utilizando um mecanismo sub - atuado por cabos. Tal tecnologia permite reduzir consideravelmente o esforço computacional exigido, bem como compactar o sistema de acionamento. Podemos ver na figura A.1.2.4 a garra Barrett e na figura A.1.2.5 o braço Barrett desenvolvido em 2000, com a garra acoplada.



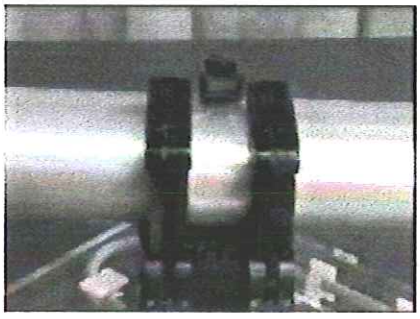
(A) Configuração a 0°



(B) Configuração a 90°



(C) Configuração a 120°



(D) Configuração a 180°

FIGURA- A.1.2.4 – Diversas configurações de fixação permitidas pela Barrett Hand. Estas figuras demonstram a versatilidade adquirida através da mobilidade lateral de dois dos três dedos.

FIGURA-A.1.2.5 – Garra Barrett acoplada ao braço homônimo

APÊNDICE 2

Coordenadas de Plücker

1. COORDENADAS DE PLÜCKER

Será apresentada uma rápida explanação sobre coordenadas de Plücker, as quais são usadas para descrever uma reta no espaço.

1.1. Introdução as Coordenadas de Plücker

A equação paramétrica de uma reta é dada por :

$$x(t) = \underline{p} + t\underline{q} \qquad \text{(B.1.1)}$$

Onde p é um ponto da reta, q é o vetor que dá sua direção e t a intensidade. Sendo:

$$\underline{q}_o = \underline{p} \times \underline{q}$$

O par $(\underline{q},\underline{q}_o)$ compõe as coordenadas de Plücker da reta (figura B.1.1). Chama-se $\underline{q}_o$ *vetor de momento* e $\underline{q}$ *vetor de direção* da reta.

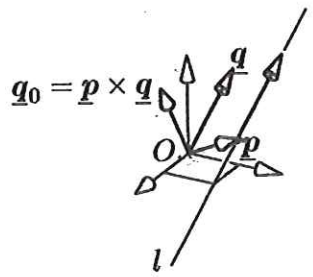


Figura B.1.1 – Coordenadas Plücker

A reta possui quatro graus de liberdade no espaço, dois a menos que um corpo rígido, pois a translação ao longo de seu eixo e a rotação ao redor deste não descrevem um movimento no espaço. Como as coordenadas de Plücker são seis, há um excesso de duas coordenadas que pode ser considerado como descrito a seguir.

Sendo $\underline{q}_o = \underline{p} \times \underline{q}$, qualquer conjunto de coordenadas de Plücker devem satisfazer:

$$\underline{q}.\underline{q}_o = 0 \qquad \text{(B.1.2)}$$

E é possível alterar sua magnitude sem alterar a reta. Considerando $k \neq 0$:

$$(\underline{q},\underline{q}_o) \equiv k(\underline{q},\underline{q}_o) \qquad \text{(B.1.4)}$$

Normalmente é conveniente normalizar as coordenadas utilizando a relação $1/|\underline{q}|$. Existem três casos utilizando-se as coordenadas de Plücker que são:

1. *Caso Geral* (Fig.B.1.2): o par $\underline{q}$ e $\underline{q}_o$ são diferentes de zero;

2. *Caso da reta passando pela origem* (Fig.B.1.3): $\underline{q}_o = 0$;

3. *Caso da reta passando ao infinito* (Fig.B.1.4): $\underline{q} = 0$.

Não há um significado das coordenadas de Plücker para $\underline{q}$ e $\underline{q}_o$ iguais a zero.
Os três casos são ilustrados nas figuras seguintes:

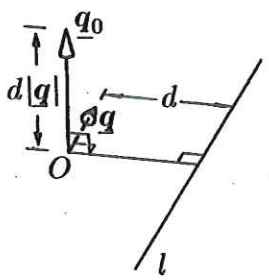


Figura B.1.2 – Caso Geral

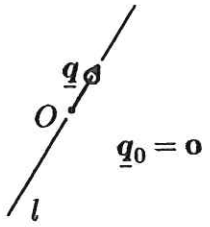


Figura B.1.3 – Caso da Reta Passando Pela Origem

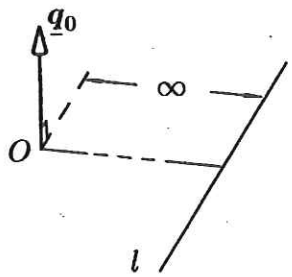


Figura B.1.4 – Caso da Reta Passando ao Infinito.

Utilizando-se estas coordenadas pode-se, de uma maneira simples, determinar o momento entre duas retas, a menor distâncias e o ângulo entre elas.

Como comentário final, é lembrado que um helicóide é representado por um eixo *l*, um passo *h* e uma amplitude *M* (Capítulo 2). Assim é possível representá-lo utilizando as coordenadas de Plücker, visto que estas possuem um excesso de duas coordenadas que agora representarão, uma o passo *h* e a outra a amplitude (magnitude) *M*. As outras quatro representam o eixo *l*.