Tarcisio Antonio Hess Coelho

TOPOLOGIA, SÍNTESE E ANÁLISE DE UMA ESTRUTURA CINEMÁTICA PARALELA

Tese apresentada à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo como
um dos requisitos para obtenção
do título de Livre-Docente

Defendida em 16/12/05

São Paulo

Julho 2005

OK

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

REITORIA

Proc. USP nº 88.1.236.3.8
Portaria nº 582
0662/06/vp

A REITORA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO, usando de suas atribuições legais, **EXPEDE** a presente Portaria para declarar que tendo TARCISIO ANTONIO HESS COELHO, Professor Doutor, ref. MS-3, do QDUSP-PG, em Regime de Dedicação Integral à Docência e à Pesquisa, lotado na Escola Politécnica (Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos), obtido o título de Livre-Docente, conforme elementos constantes do Processo USP nº 88.1.236.3.8, fica, a contar de **14/03/2006**, designado para exercer a função de Professor Associado, ref. MS-5, do mesmo Quadro, Parte, Regime e Lotação, nos termos do artigo 84 do Estatuto da Universidade de São Paulo.

Reitoria da Universidade de São Paulo,. 28 MAR 2006

SUELY VILELA
Reitora

Dedico esta obra à minha querida esposa Elizabeth,
que sempre me apoiou e compreendeu
a minha dedicação à esta obra,
e aos meus amados filhos,
Tarcisio e
Helena.

Agradecimentos

Ao Prof. Prof. Bernard Roth, por seus valiosos comentários acerca da modelagem cinemática de estruturas paralelas, e por me receber como professor visitante na Stanford University.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Ensino Superior (CAPES), pela concessão de bolsa de estágio pós-doutoral, processo BEX 0471/01-1.

À Universidade de São Paulo, pelo afastamento concedido para realizar estágio pós-doutoral no exterior.

Resumo

Esta tese tem por objetivo propor um método de síntese topológica de estruturas cinemáticas paralelas tendo em vista sua utilização como punhos robóticos. Uma, dentre as arquiteturas recomendadas pelo método, é analisada teoricamente, avaliando-se o seu desempenho sob o ponto de vista cinemático. Para verificação dos resultados teóricos, um protótipo da estrutura cinemática paralela considerada é ensaiada e seu comportamento é observado nas condições de operação.

"Abstract"

This dissertation proposes a method for topological synthesis of kinematic parallel structures in order to be applied as robotic wrists. One among the architectures recommended by the method, is theoretically analysed, so its kinematic performance is evaluated. In order to verify the theoretical results, a prototype of the considered kinematic parallel structure is tested and its behavior is observed under operating conditions.

Sumário

Dedicatória ii

Agradecimentos iii

Resumo iv

"Abstract" v

Listas de Figuras vii

Lista de Tabelas ix

Lista de símbolos x

1 Introdução 1

1.1 Considerações preliminares 1

1.2 Objetivos 2

1.3 Sobre a divisão do trabalho 2

2 Revisão da Literatura 3

2.1 Topologia 3

2.2 Cinemática 9

2.3 Problemas abertos 18

3 Síntese topológica de uma estrutura cinemática paralela 20

3.1 Introdução 20

3.2 Métodos para geração das topologias e seleção das arquiteturas candidatas 22

3.3 Critérios para ordenação 26

3.4 Ordenação qualitativa 28

4 Avaliação do desempenho da arquitetura escolhida 32

4.1 Análise cinemática 32

4.2 Configurações singulares 37

4.3 Espaço de trabalho 41

4.4 Modelo experimental: protótipo construído 47

5 Discussão 52

6 Conclusões 56

Anexo A 58

Lista de Referências 59

Lista de Figuras

2.1 – Diagrama cinemático de uma estrutura cinemática paralela e suas partes integrantes 4

2.2 – Cadeias cinemáticas: (a) aberta ; (b) fechada 5

2.3 – (a) Robô Delta (ABB, 2004), (b) Notação na forma de Grafos para o robô Delta 6

2.4 - Mecanismo paralelo 3 *RRR* 8

2.5 - (a) *Neos-Tricept* (ABB, 2003) e (b) seu diagrama cinemático 9

2.6 – Modelagem em diferentes estruturas cinemáticas: (a) atuadores rotativos; (b), (c) atuadores lineares 10

2.7 – Controle de posição baseado na cinemática inversa 12

2.8 – Controle de posição baseado na cinemática direta e inversa 13

2.9 – Novas arquiteturas: (a) *Robô Cartesiano Universal* (KIM; TSAI, 2002), *Tripteron* (GOSSELIN et al., 2004); (b) *3 PCC* 14

2.10 – Singularidades do mecanismo *RRRRR* 15

2.11 – Emprego de atuadores adicionais para evitar os efeitos indesejáveis das singularidades (KIM et al., 1999) 16

2.12 – Mecanismo *2 PRS+2 PUS* e seu espaço de trabalho de translação, determinado a partir do método baseado na discretização (RASZL, 2003) 17

2.13 – Mecanismo 6 *PUS* e seu espaço de trabalho de translação, determinado a partir do método geométrico (BONEV; RYU, 2001b) 18

3.1- Mecanismo de punho da Bendix. (TSAI, 1999) 20

3.2 – Pulsos convencionais: (a) arfagem-guinada-rolamento e (b) rolamento-guinada-rolamento 21

3.3 - Arquiteturas possíveis: (a) *3 RRR*, (b) *(3 RRR) ^ R*, (c) *3 RRR + RUR*, (d) *3 UPU*, (e) *3 RUU*, (f) *(3 RUU)^R*, (g) *3 RRS*, (h) *(3 RPS) ^R*, (i) *3 RPS + RUPR*, obtidas pela aplicação do método de enumeração de cadeias ativas; (j) *3 RUS + S*, (k) *(3 RUS + S) ^ R*, (l) *3 RUS + UR*, (m) *3 RUS + RUR*, geradas a partir do método de adição de uma cadeia passiva; (n) *3RRR+S* , (o) *4 SPS + S* outras arquiteturas extraídas da literatura 25

3.4 – Arquiteturas ordenadas de acordo com seus índices de desempenho 31

4.1 – Indicação da nomenclatura adotada para modelagem do *3 RRR + RUR* 33

4.2 – Notação para a análise do i-ésimo membro *RRR* 33

4.3 – Notação para a análise do membro *RUR* 37

4.4 – Singularidades do membro *RRR*: (a) primeira solução; (b) segunda solução 39

4.5 – Singularidades do membro *RUR* 41

4.6 –Espaço de trabalho teórico: comportamento do ângulos dos atuadores 1, 2 e 3 41

em função do ângulo de orientação φ_1, sendo que φ_2 é nulo

4.7 –Espaço de trabalho teórico: comportamento do ângulos dos atuadores 1, 2 e 3 em função do ângulo de orientação φ_2, sendo que φ_1 é nulo 42

4.8 –Espaço de trabalho teórico: comportamento do ângulo do atuador 1 em função dos ângulos de orientação φ_1 e φ_2, (a) superfície , (b) vista de topo. 43

4.9 –Espaço de trabalho teórico: comportamento do ângulo do atuador 2 em função dos ângulos de orientação φ_1 e φ_2, (a) superfície , (b) vista de topo. 44

4.10 –Espaço de trabalho teórico: comportamento do ângulo do atuador 3 em função dos ângulos de orientação φ_1 e φ_2 , (a) superfície , (b) vista de topo. 45

4.11 – Espaço de trabalho teórico: comportamento do ângulo do atuador 4 em função dos ângulos de orientação φ_1 , φ_2 e φ_4 , (a) $\varphi_4 = 0°$, (b) $\varphi_4 = 30°$, (c) $\varphi_4 = 60$ 46

4.12 – Protótipo do punho robótico 48

4.13 – Espaço de trabalho real: calota esférica de ângulo sólido de 120 graus 49

4.14 – Ângulo de rolamento: (a) *3 RRR* e (b) *3 RRR+RUR* 50

Fig. 4.15 – Ensaios de movimentação do punho: (a) posição inicial, (b) rotação φ_1 em torno do eixo x, (c) rotação φ_2 em torno do eixo y, (d) rotação φ_3 da plataforma móvel em torno do eixo z, (e) rotação em torno do eixo x, seguida de rotação φ_4 do órgão terminal . 51

5.1 – Ângulo de rolamento: (a) *3 RRR* e (b) *3 RRR+RUR* 54

Lista de Tabelas

2.1 – Tipos de juntas (SUH; RADCLIFFE, 1978) 5
3.1 – Arquiteturas geradas e suas propriedades 24
3.2 – Arquiteturas modificadas de modo a melhor satisfazer os requisitos de projeto do punho 24
3.3 – Baixa complexidade estrutural (b.c.e.) 27
3.4 – Presença de juntas de ampla faixa de deslocamento (j.a.f.d.) 28
3.5 – Localização remota dos atuadores (l.r.a.) 29
3.6 – Movimento esférico (m.e.) 30
3.7 – Redundância (red.) 30
4.1 – Parâmetros estruturais comuns dos membros *RRR* 39
4.2 - Outros parâmetros correspondentes a cada membro *RRR* 39
4.3 - Configurações singulares para os membros *RRR* 40
4.4 - Configurações singulares para os membros *RUR* 40
4.5 – Subsistemas do punho robótico 48

Lista de Símbolos

C	junta cilíndrica
C_k	conectividade da cadeia ou membro k
C_T	conectividade total de uma estrutura cinemática
$c\varphi$	cosseno do ângulo φ
f_i	número de graus de liberdade permitidos pela junta i
$\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \varphi_4$	coordenadas de orientação do órgão terminal
j	número de juntas presentes no mecanismo
J_q, J_x	matrizes jacobianas
λ	graus de liberdade associado à dimensão do espaço em que um mecanismo ou estrutura cinemática opera
M	mobilidade do mecanismo
m	número de membros ativos
n	número de peças que um mecanismo contém
P	junta prismática
$\boldsymbol{q}$	vetor cujas componentes estão associadas aos deslocamentos dos atuadores
${}^A_BR$	matriz de rotação do sistema de referência B em relação ao sistema A
R	junta de rotação
S	junta esférica
$s\varphi$	seno do ângulo φ
${}^A_BT$	matriz de transformação homogênea das coordenadas do sistema de referência B em relação ao sistema de referência A
$\theta_1, \theta_2, \theta_3$ e θ_4	deslocamentos impostos pelos atuadores
U	junta universal
$\boldsymbol{v}$	vetor v
$\dot{\boldsymbol{v}}$	derivada em relação à variável tempo do vetor $\boldsymbol{v}$
$\boldsymbol{x}$	vetor cujas componentes estão associadas aos deslocamentos da plataforma móvel
x_A, y_A, z_A	eixos ortogonais do sistema de referência A

1 Introdução

1.1 Considerações preliminares

Tradicionalmente, em aplicações industriais predominam robôs cujas arquiteturas correspondem a estruturas cinemáticas seriais, ou seja, seus atuadores e peças movidas são dispostos em série, um após o outro, formando uma única cadeia cinemática aberta, de modo a posicionar o órgão terminal, a parte do robô que comumente contêm uma garra ou um eletrodo de solda. Recentemente, tanto as comunidades acadêmica como industrial têm manifestado um interesse crescente pela utilização de um outro tipo de estrutura cinemática, denominada paralela, que se caracteriza pela presença de várias cadeias cinemáticas independentes, atuando de forma paralela ou simultânea sobre o órgão terminal. Esta arquitetura não-convencional apresenta, potencialmente, uma série de vantagens se comparada à tradicional serial. Dentre elas podem ser citadas: alta rigidez, leveza, rapidez, precisão e alta capacidade de carga. No entanto, apesar dos avanços conseguidos nesta direção, existem uma série de problemas abertos que necessitam de uma investigação mais profunda, de modo a garantir que esta mudança de tendência venha a ser implementada com eficácia.

Há, por exemplo, a necessidade do desenvolvimento de métodos de síntese topológica para geração de estruturas cinemáticas paralelas candidatas que satisfaçam a determinadas especificações de projeto. Tais especificações estão associadas à mobilidade e aos tipos de movimentos a serem disponibilizados pelo órgão terminal.

Outros problemas referem-se a questões cinemáticas, tais como a probabilidade maior de ocorrência de configurações singulares dentro do espaço de trabalho. Estas singularidades, dependendo do seu tipo, podem causar travamento do robô ou mesmo a sua incontrolabilidade. Desta forma, a estrutura paralela deve ter a capacidade de lidar com tais configurações sem prejudicar o seu funcionamento.

1.2 Objetivos

Esta pesquisa tem por objetivo propor um método de síntese topológica de estruturas cinemáticas paralelas tendo em vista sua utilização como punhos robóticos. Uma, dentre as arquiteturas a serem recomendadas pelo método, será analisada, teoricamente, avaliando-se o seu desempenho sob o ponto de vista cinemático. Para verificação dos resultados teóricos, a estrutura cinemática paralela será construída e ensaiada nas condições de operação.

1.3 Sobre a divisão do trabalho

O capítulo 2 se inicia com uma revisão da literatura apresentando os fundamentos acerca da topologia de estruturas cinemáticas paralelas. São tratadas, em detalhe, importantes questões cinemáticas tais como, análise de posição e velocidade, predição de ocorrência de singularidades e avaliação do espaço de trabalho. Também são enumerados alguns problemas abertos relativos a este campo de pesquisa.

No capítulo 3, apresenta-se um procedimento qualitativo para sintetizar um punho robótico paralelo. O procedimento proposto compreende três etapas: geração de topologias de acordo com os requisitos de projeto do punho; definição dos critérios de ordenação e do índice de desempenho; escolha da arquitetura com melhor índice.

A avaliação do desempenho da arquitetura recomendada pelo método proposto é desenvolvida no capítulo 4. Desta forma, são avaliados tanto o espaço de trabalho disponível como a eventual presença de configurações singulares neste mesmo espaço.

No capítulo 5, discutem-se tanto as características do procedimento proposto de síntese topológica como os resultados apresentados no capítulo 4.

Finalmente, no capítulo 6, são apresentadas as principais conclusões da tese e também são incluídas sugestões de temas de pesquisa futura.

2 Revisão da Literatura

Conforme mencionado anteriormente, as estruturas cinemáticas paralelas se apresentam como alternativas às tradicionais seriais devido a uma série de vantagens potenciais, em termos de rigidez, leveza, resposta dinâmica, precisão e capacidade de carga. Conseqüentemente, na última década observou-se um interesse crescente tanto na investigação teórica como no desenvolvimento de robôs baseados em arquiteturas paralelas.

Esta revisão da literatura concentra-se nos principais tópicos da pesquisa atual neste campo e, ao mesmo tempo, enumera vários problemas abertos. A seção 2.1 trata dos fundamentos acerca da topologia de estruturas cinemáticas paralelas. Assim, são descritas suas funções básicas, formas de representação e os métodos de geração de suas topologias. A seção 2.2 aborda em detalhe as principais questões cinemáticas tais como, análise de posição e velocidade, predição de ocorrência de singularidades e avaliação do espaço de trabalho. Finalmente, a seção 2.3 enumera uma lista de problemas abertos relativos a este campo de pesquisa.

2.1 Topologia

Uma *estrutura cinemática paralela* é definida como um mecanismo de cadeia fechada em que a plataforma móvel ou órgão terminal (peça cujo movimento de saída seja o de interesse) encontra-se conectada a uma base fixa por, pelo menos, duas cadeias cinemáticas independentes (MERLET, 2000). Alguns autores costumam denominar tais cadeias cinemáticas membros (TSAI, 1999) ou ainda pernas (DI GREGORIO; PARENTI-CASTELLI, 2001).

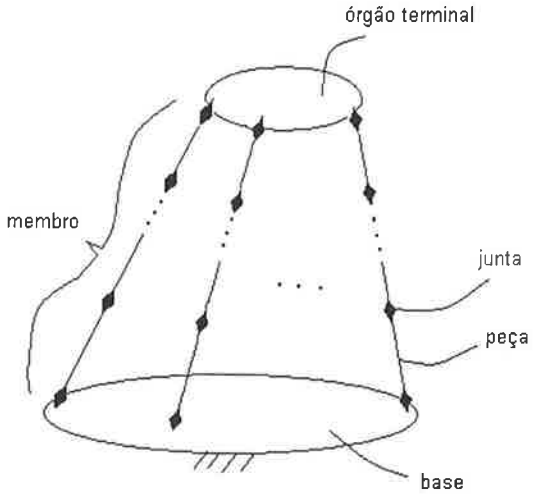


Fig. 2.1 – Diagrama cinemático de uma estrutura cinemática paralela e suas partes integrantes.

Considerando a definição anterior, algumas observações adicionais se fazem necessárias para explicar os termos utilizados. Uma *cadeia cinemática* é um sistema mecânico cujas *peças* encontram-se conectadas por *juntas* ou *pares cinemáticos*. Uma junta define o movimento relativo entre as peças por ela conectadas. Assim, a caracterização de um tipo específico de junta está intrinsicamente associada ao número de graus de liberdade que ela permite ou restringe. Uma cadeia cinemática é dita *fechada* quando suas extremidades encontram-se unidas. No caso de suas extremidades estarem separadas, a cadeia é chamada de *aberta* (fig.2.2). Ao analisar duas cadeias de um mesmo mecanismo, quando o movimento de uma é completamente determinado pelo da outra, elas são *dependentes*; caso contrário, as cadeias são ditas *independentes*.

O adjetivo *paralelo* refere-se à forma de atuação do mecanismo. A maioria dos seus membros são ativos, o que significa que eles contém pelo menos um atuador em cada membro. Isto é justamente o oposto do termo *serial*, cuja principal característica é a presença de vários atuadores em uma única cadeia aberta, e corresponde à arquitetura predominante empregada em manipuladores robóticos e máquinas-ferramentas.

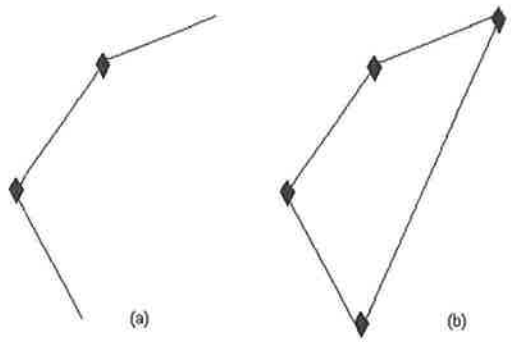
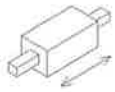
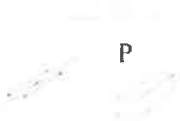
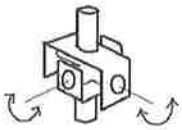
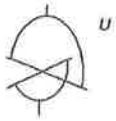


Fig. 2.2 – Cadeias cinemáticas: (a) aberta ; (b) fechada.

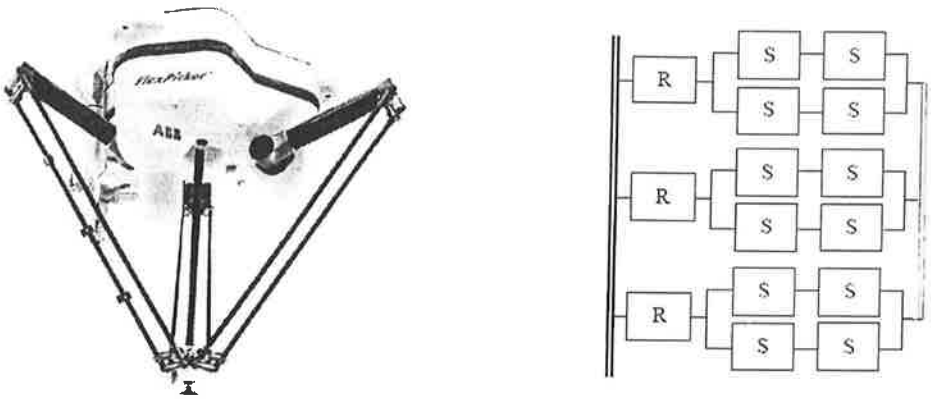
Tabela 2.1 – Tipos de juntas (SUH; RADCLIFFE, 1978)

Junta	Geometria	Representação	Graus de Liberdade
1. de Rotação (R)			1
2. Prismática (P)			1
3. Cilíndrica (C)			2
4. Universal (U)			2
5. Esférica (S)			3

Da mesma forma que se empregam diagramas simplificados para representar circuitos elétricos, hidráulicos e pneumáticos, os diagramas cinemáticos são utilizados para representar mecanismos. Geralmente, as peças são simbolizadas por segmentos de reta. No caso das

juntas, não há uma convenção única para sua forma de representação. A tabela 2.1 apresenta formas alternativas de representação para juntas de rotação (ou revolução), prismáticas, cilíndricas, universais e esféricas.

A convenção para a *notação literal* (BONEV, 2001) identifica os tipos de membros que conectam a base à plataforma móvel. Cada membro é representado por uma seqüência de letras, sendo que cada letra significa um tipo de junta. A ordem em que as letras aparecem na seqüência também obedece a uma convenção: a letra à esquerda considera a junta mais próxima à base e a letra à direita representa a junta mais próxima da plataforma móvel. Se um tipo de membro aparecer mais de uma vez, então um número associado a este número de vezes é acrescentado à seqüência de letras. Uma letra sublinhada representa uma junta ativa, ou seja, uma das peças associada a esta junta encontra-se acoplada a um atuador. Por exemplo, a estrutura cinemática *3 RRR* é composta por três membros idênticos que contém três juntas de rotação cada um. Os três atuadores presentes neste mecanismo encontram-se na sua base. A plataforma de Gough-Stewart (DASGUPTA; MRUTHYUNJAYA, 2000) é identificada como *6 UPS* e, conseqüentemente, em seus seis membros estão presentes juntas universais, prismáticas e esféricas, sendo que seus atuadores estão acoplados às peças das juntas prismáticas.



a b

Fig. 2.3 – (a) Robô Delta (ABB, 2004), (b) Notação na forma de Grafos para o robô Delta.

A notação na forma de *Grafos* (PIERROT; COMPANY, 1998) obedece à mesma seqüência da notação literal, porém não é tão compacta. É mais adequada se o mecanismo paralelo apresentar uma estrutura assimétrica.

O método mais tradicional para geração de topologias é o critério de *Gruebler-Kutzbach* (TSAI, 1999), definido pela eq. (2.1). Do ponto de vista do projetista, ele funciona como um procedimento de tentativa-e-erro. Uma vez que λ, o número de graus de liberdade associado à dimensão do espaço onde se supõe que o mecanismo deva operar, esteja definido, ele/ela deve estimar quantas peças (n) o mecanismo conterá, como elas se encontram conectadas (j, f_i) e verificar se a mobilidade calculada (M) corresponde à desejada. No entanto, este procedimento apresenta um inconveniente: alguns mecanismos que não obedecem tal critério, o que significa que eles podem apresentar uma mobilidade maior ou menor do que aquela calculada. Como exemplos, podem ser citados o mecanismo de Bennet (ANANTHASURESH, G.K.; KOTA, S., 1993) e o Tripteron (GOSSELIN et al., 2004). Para ser bem-sucedido ao utilizar este critério o projetista necessita de alguma experiência e criatividade.

$$M = \lambda \cdot (n - 1 - j) + \sum_{i=1}^{j} f_i \tag{2.1}$$

Um procedimento mais sistemático é o *método de enumeração de cadeias ou membros ativos* (HUNT, 1983). O método, que se baseia no critério de *Gruebler-Kutzbach*, necessita de algumas informações adicionais que funcionam como restrições. Admite-se que o número de membros ativos m – as cadeias abertas que conectam a base à plataforma móvel – seja igual a M. Além disto, a *conectividade total* C_T (SHOHAM; ROTH, 1997), definida como a soma dos graus de liberdade de todos os membros, pode ser determinada empregando-se a eq. (2.2). Conhecidos este valor e o número de membros, é possível enumerar algumas estruturas cinemáticas que satisfaçam estas condições. Estas estruturas cinemáticas podem ser simétricas ou assimétricas.

$$(\lambda + 1) \cdot M - \lambda = C_T \tag{2.2}$$

O mecanismo 3 $\underline{R}RR$ (fig. 2.4) é paralelo com mobilidade 3. Como tal mecanismo deve operar no plano, λ é igual a três. Para definição do posicionamento e orientação da plataforma móvel, três graus de mobilidade são necessários e, desta forma, tanto M quanto m são iguais a três. De acordo com a eq. (2.2), C_T vale nove. Como todos os três membros são simétricos, as conectividades parciais de cada membro também valem três.

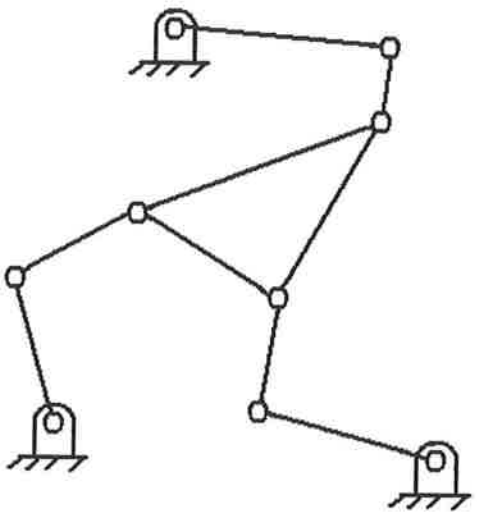
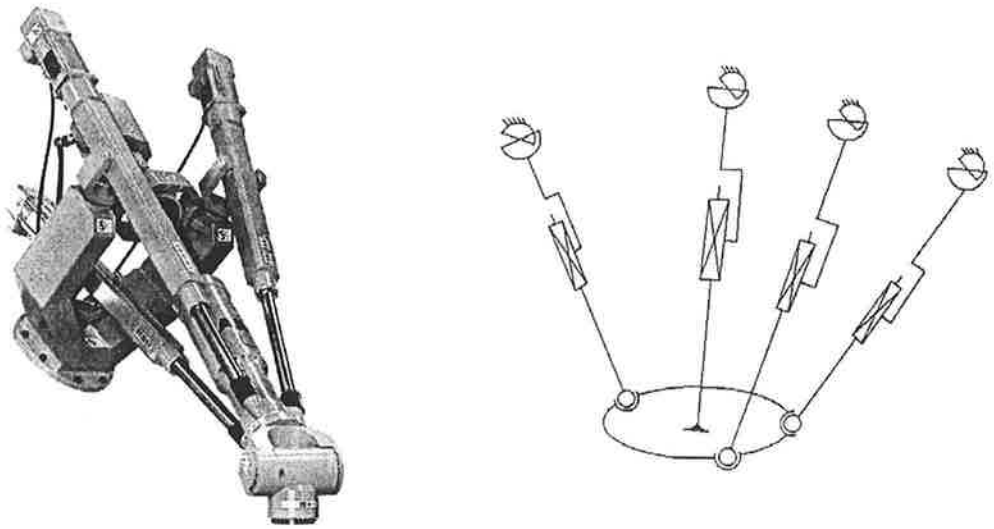


Fig. 2.4 - Mecanismo paralelo 3 $\underline{R}RR$.

O *método da adição de uma cadeia ou membro passivo* (BROGÅRDH, 2002; ZHANG; GOSSELIN, 2001) considera que o movimento da plataforma móvel seja limitado pelo membro passivo a ela conectado. Portanto, o membro passivo é cuidadosamente escolhido de tal forma que tanto a mobilidade como os tipos de movimentos para o órgão terminal sejam os especificados. Além disto, as conectividades parciais dos m membros ativos restantes deve ser igual a λ. A *Neos-Tricept* (fig. 2.5a) é uma máquina-ferramenta projetada de acordo com este método. O movimento de sua plataforma móvel é limitado por um membro passivo *UP*. Os atuadores encontram-se instalados nos três membros ativos $U\underline{P}S$, e a

conectividade de cada membro é igual a seis. Conseqüentemente, ela é capaz de executar três movimentos independentes: uma translação e duas rotações.



a b

Fig. 2.5 - (a) *Neos-Tricept* (ABB, 2003) e (b) seu diagrama cinemático.

2.2 Cinemática

A análise de posições é fundamental para determinação das relações matemáticas entre a localização da plataforma móvel *(p.m.)* e os deslocamentos impostos por seus atuadores. Esta análise inicia-se com a consideração de um dos M membros presentes na estrutura cinemática. Em geral, admite-se que este *j-ésimo* membro contenha apenas 3 juntas e duas peças, que neste trabalho serão denominadas peças superior *(p.s.)* e inferior *(p.i.)*. Como pode-se observar na fig. 2.6, os atuatores podem ser rotativos ou lineares.

Uma vez que a arquitetura esteja definida, é possível descrever a translação da plataforma móvel mediante a localização de um ponto que pertença a esta, definido na fig. 2.6 como G, expressando-se suas coordenadas com respeito a um sistema de referência fixo à base *(b)*. Com relação à orientação da plataforma móvel, esta pode ser descrita através dos 9 elementos de sua matriz de rotação ${}_{p.m.}^{b}R$, que podem ser determinados a partir de parâmetros

definidos por representações que empreguem co-senos diretores, eixo da helicóide ou ainda ângulos de Euler (TSAI, 1999).

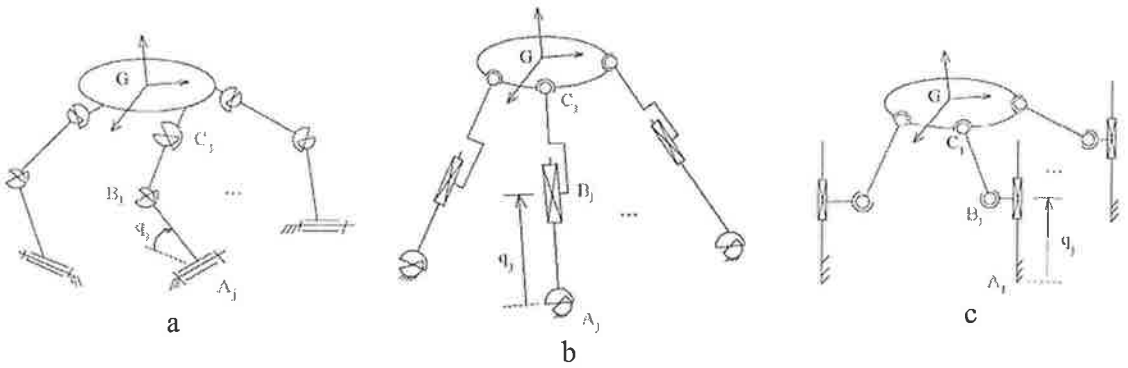


Fig. 2.6 – Modelagem em diferentes estruturas cinemáticas: (a) atuadores rotativos; (b), (c) atuadores lineares.

A descrição completa da sua localização (posição e orientação) pode ser realizada utilizando-se transformações homogêneas (CRAIG, 1989), e considerando-se o ponto C_j, que corresponde ao centro da junta que conecta a plataforma móvel à peça superior. Em termos matemáticos, esta descrição pode ser representada através da matriz de rotação ${}^{b}_{p.m.}R$, do vetor de translação ${}^{b}G$ e de um vetor local ${}^{p.m.}C_j$.

$$\begin{bmatrix} {}^{b}C_j \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} {}^{b}_{p.m.}R & {}^{b}G \\ 0 \;\; 0 \;\; 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {}^{p.m.}C_j \\ 1 \end{bmatrix} \tag{2.3}$$

Por outro lado, o ponto B_j, centro da junta que conecta a peça superior à inferior, pode ser descrito por duas matrizes de transformação ${}^{b}_{s.i.}T$ e ${}^{s.i.}_{p.i.}T$, e um vetor local ${}^{p.i.}B_j$. O índice *s.i.* significa sistema de referência intermediário.

$$\begin{bmatrix} {}^{b}B_j \\ 1 \end{bmatrix} = {}^{b}_{s.i.}T \, {}^{s.i.}_{p.i.}T \begin{bmatrix} {}^{p.i.}B_j \\ 1 \end{bmatrix} \tag{2.4}$$

O acoplamento entre as coordenadas do vetor $\boldsymbol{x}$ que define completamente a localização da plataforma móvel e as coordenadas do vetor $\boldsymbol{q}$ que define os deslocamentos impostos pelos atuadores é obtida a partir da equação (2.5)

$$\left({}^{b}B_j - {}^{b}C_j\right)^T \left({}^{b}B_j - {}^{b}C_j\right) = L_j^2 \tag{2.5}$$

sendo que L_j é o comprimento da peça superior. Esta equação, válida para o membro j, pode ser generalizada na forma

$$\boldsymbol{\phi}\ (\boldsymbol{q}, \boldsymbol{x}) = \boldsymbol{0} \tag{2.6}$$

sendo que $\boldsymbol{\phi}$ é um conjunto de M funções implícitas dos vetores $\boldsymbol{q}$ e $\boldsymbol{x}$, e $\boldsymbol{0}$ é um vetor nulo de dimensão M. Nos casos em que as estruturas paralelas sejam assimétricas ou ainda que a junta C_j seja prismática ou cilíndrica, pode-se ainda modelar a partir dos membros ativos ao invés da plataforma móvel, e incluir equações de vínculo adicionais, de modo a considerar a posição relativa dos pontos C_j em relação ao ponto G.

Normalmente, a análise de posições é dividida em duas categorias de problemas: cinemática inversa e direta (TSAI, 1999; MERLET, 2000). A meta da cinemática inversa é determinar o vetor $\boldsymbol{q}$, admitindo-se que o vetor $\boldsymbol{x}$ seja conhecido. A cinemática direta possui objetivo contrário: determinar $\boldsymbol{x}$ quando $\boldsymbol{q}$ for conhecido. No problema da cinemática inversa, as eqs. (2.6) são não-lineares e independentes, assim cada j-ésima equação pode ser resolvida separadamente das demais, na incógnita q_j. Por outro lado, no problema da cinemática direta, as eqs. (2.6) são também não-lineares porém dependentes e, portanto, devem ser consideradas como um sistema de equações não-lineares com x_j incógnitas. Em conseqüência do acoplamento entre as equações, a cinemática direta, em estruturas de cinemática paralela, constitui-se num problema que oferece maiores dificuldades do que a cinemática inversa.

Em geral, utilizam-se métodos analíticos e numéricos para obtenção das soluções das eqs. (2.6). Os métodos analíticos, através de manipulações algébricas tais como técnicas de eliminação dialítica (RAGHAVAN; ROTH, 1990), modificam o sistema original de M equações, transformando-o em uma equação polinomial de grau n apresentando uma única incógnita. O grau n da equação polinomial não coincide com M, mas depende da

complexidade do mecanismo paralelo. Por exemplo, n é igual a 8 para o mecanismo plano *3 RRR* ou 16 para geometrias especiais do 6 *UPS*.

Os métodos numéricos se baseiam em técnicas como os métodos de Newton-Raphson, de Broyden (PRESS et al., 1994), continuação polinomial (MORGAN, 1983) e análise de intervalos (MERLET, 2002, 2003) para determinar iterativamente uma solução a partir de uma estimativa inicial.

Contudo, ambos procedimentos de solução apresentam algumas dificuldades. Ao empregar métodos analíticos, deve-se escolher a raiz da equação polinomial que efetivamente corresponda à configuração atual da estrutura. Desta forma, ao se planejar o seu movimento, deve estar previsto um módulo de seleção da solução, sendo que o resultado deve ser obtido em tempo real. Por outro lado, os algoritmos baseados em métodos numéricos podem consumir um tempo de processamento excessivo para alcançar a convergência ou até mesmo convergir para uma solução incorreta.

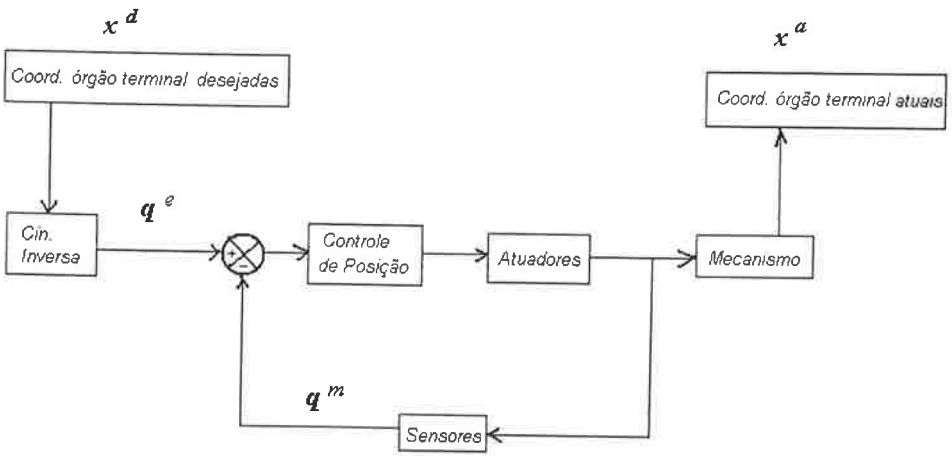


Fig. 2.7 – Controle de posição baseado na cinemática inversa. As letras *d, a, e, m* significam respectivamente, desejadas, atuais, estimadas e medidas.

Tanto a cinemática inversa como a direta são fundamentais para a previsão do comportamento de uma estrutura paralela e do seu controle. De fato, considerando-se que os sensores de movimento estejam localizados junto aos atuadores e não na plataforma móvel,

então para se executar o controle de posição podem ser adotadas duas estatégias (HUANG et al., 2000). A primeira (fig.2.7), que utiliza apenas a cinemática inversa, realiza o controle no espaço das juntas ("joint space") monitorando os valores das variáveis q fornecidos pelos sensores. A segunda (fig.2.8) realiza o controle no espaço cartesiano ("cartesian space"), e também emprega a cinemática inversa, porém utiliza a direta para calcular e monitorar a localização da plataforma a partir dos sinais lidos pelos sensores.

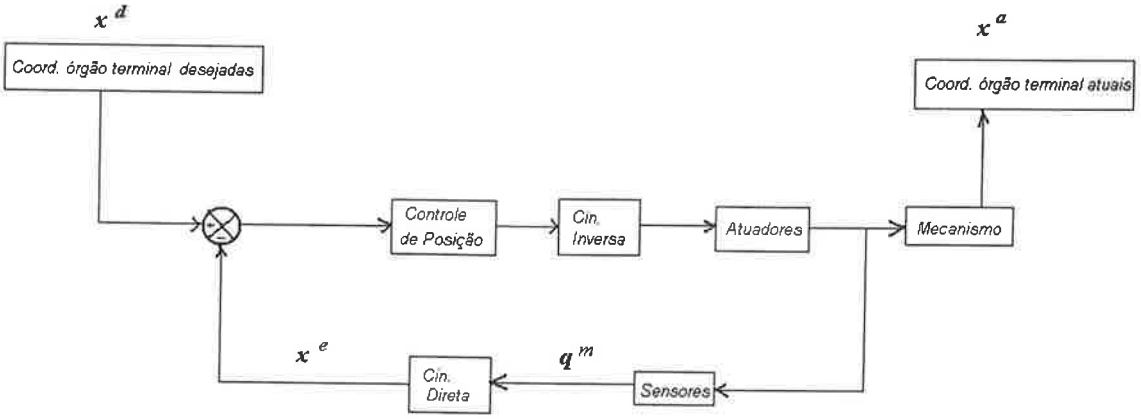
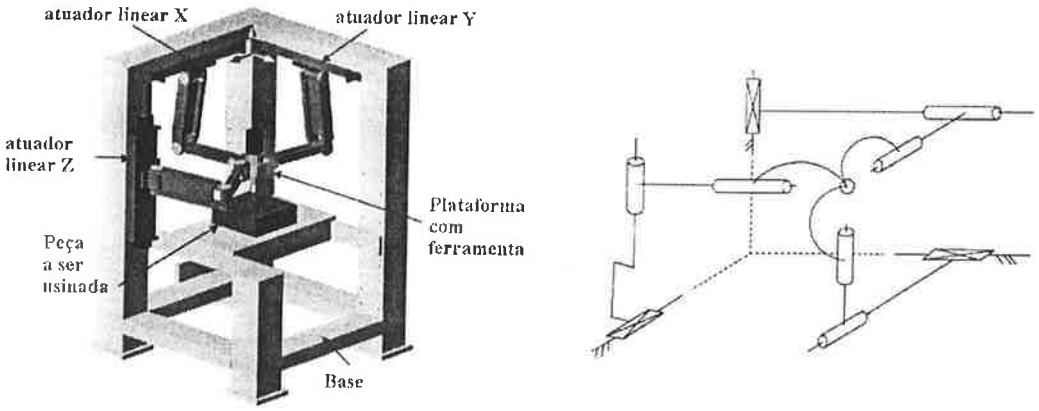


Fig. 2.8 – Controle de posição baseado na cinemática direta e inversa.

Conforme apresentado anteriormente, a cinemática direta trata da determinação da pose atual da plataforma móvel num dado instante se os deslocamentos impostos por todos os atuadores forem conhecidos. Assim, quando os valores destes deslocamentos não se alterarem, o mecanismo torna-se uma estrutura que pode ser montada em diferentes configurações. Em termos práticos, estas diversas formas de montagem da estrutura são calculadas a partir dos sinais lidos pelos sensores, cujo número normalmente coincide com o número de atuadores. Tal indeterminação pode causar dificuldades para se avaliar a pose atual da plataforma móvel ao se ligar a máquina ou mesmo ao se controlar um movimento específico da plataforma. PARENTI-CASTELLI e GREGORIO (1998, 1999) propuseram a utilização de sensores angulares adicionais na estrutura cinemática, de modo a facilitar a seleção da solução correta dentre as possíveis, eliminando assim a ambigüidade original. A

cinemática direta permite ainda avaliar a influência dos erros de posicionamento dos atuadores sobre a localização da plataforma (SOUZA, 1997).

Recentemente, novas arquiteturas com mobilidade 3, tais como o *Robô Cartesiano Universal* (KIM; TSAI, 2002, fig.2.9a), *Tripteron* (GOSSELIN et al., 2004) e *3 PCC* (DI GREGORIO; PARENTI-CASTELLI, 2004, fig.2.9b) apresentam uma característica notável: seus sistemas de equações definidos pela eq. (2.6) são lineares e completamente desacoplados, sendo que este resultado é válido tanto para a cinemática inversa como para a direta.



a b

Fig. 2.9 – Novas arquiteturas: (a) *Robô Cartesiano Universal* (KIM; TSAI, 2002), *Tripteron* (GOSSELIN et al., 2004); (b) *3 PCC*.

A análise de velocidades trata das relações matemáticas entre os vetores-velocidade associados à plataforma e as velocidades dos atuadores. Uma conseqüência direta de tal estudo é a previsão de ocorrência de singularidades. Em configurações singulares, um mecanismo paralelo pode apresentar mudanças significativas de comportamento, tornando-se até mesmo incontrolável. De modo a se prever estas situações indesejáveis, a análise das matrizes jacobianas é normalmente considerado um procedimento válido para determinar as configurações singulares (TSAI, 1999). A equação matricial (2.7) é derivada a partir das equações de análise de posições apresentadas anteriormente.

$$J_x \, \dot{x} = J_q \, \dot{q} \tag{2.7}$$

sendo que os vetores $\dot{x}$ e $\dot{q}$ correspondem as derivadas em relação ao tempo, respectivamente, das coordenadas da plataforma móvel e das juntas ativas.

Quando o determinante da matriz J_q torna-se nulo, o mecanismo paralelo nesta configuração singular alcançou as fronteiras do espaço de trabalho, que são dependentes, por exemplo das dimensões de suas peças e dos cursos dos atuadores. Assim, a estrutura cinemática paralela perde um ou mais graus de mobilidade. Por outro lado, quando o determinante de J_x torna-se nulo, o mecanismo paralelo neste tipo de singularidade torna-se incontrolável. Mesmo se os eixos de saída dos atuadores estiverem imóveis, a plataforma móvel pode executar um movimento não-previsto e, conseqüentemente, o mecanismo paralelo adquire graus de mobilidade adicionais, porém inúteis.

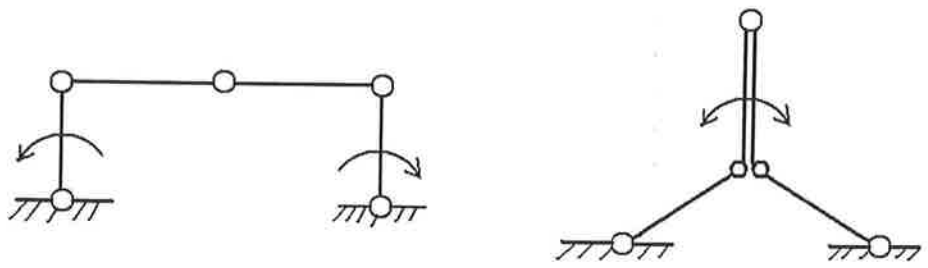


Fig. 2.10 – Singularidades do mecanismo $\underline{R}RRR\underline{R}$.

De modo a se evitar que uma estrutura alcance tais configurações, algumas estratégias foram propostas: utilização de mecanismos redundantes (KURTZ; RAYWARD, 1992; VALASEK et al., 2004), que contêm um número maior de atuadores do que o necessário para posicionar e orientar a plataforma móvel; redução do espaço de trabalho disponível, o que significa que a plataforma móvel se moverá num espaço de trabalho menor do que o possível, mas que não contenha singularidades; seleção de trajetórias alternativas para a plataforma que sejam livres de singularidades dentro do espaço de trabalho possível (BHATTACHARYA et al., 1998).

O espaço de trabalho de estruturas cinemáticas paralelas é definido como a região dentro da qual a plataforma móvel é capaz de movimentar-se. Dois tipos de espaço de trabalho são normalmente analisados. Um deles é o espaço de trabalho de translação (MERLET, 2002), que representa a região tridimensional ou bidimensional na qual um ponto que pertença à plataforma móvel possa deslocar-se, enquanto a plataforma mantém a sua orientação. O outro tipo é denominado de espaço de trabalho de orientação (BONEV; RYU, 2001a), que define todas as possíveis orientações da plataforma móvel para uma dada localização de um ponto que a ela pertença.

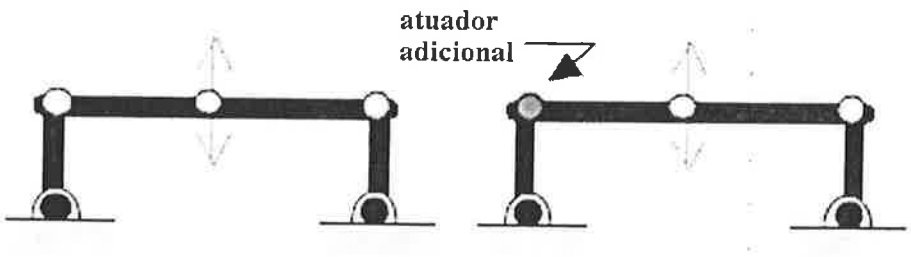


Fig. 2.11 – Emprego de atuadores adicionais para evitar os efeitos indesejáveis das singularidades (KIM et al., 1999).

Há duas formas de se representar graficamente o espaço de trabalho de translação de um mecanismo paralelo: por meio de gráficos tridimensionais e bidimensionais. Nos gráficos tridimensionais, um sólido representa a região dentro da qual um ponto pertencente à plataforma móvel pode executar uma trajetória possível. Nos gráficos bidimensionais, admite-se que somente duas das três coordenadas de um ponto da plataforma variem simultaneamente, enquanto a outra coordenada permanece constante. Com relação ao espaço de trabalho de orientação, alguns autores costumam registrá-lo através de cartas topográficas bidimensionais cujo contorno nos planos xy, xz e yz coincide com as fronteiras do espaço de trabalho de translação. Cada carta indica o ângulo de inclinação da plataforma móvel nos sentidos horário e anti-horário.

Sob um ponto de vista prático, um procedimento para avaliar o espaço de trabalho de um mecanismo paralelo deve considerar algumas restrições cinemáticas e físicas. As restrições cinemáticas referem-se à ocorrência de configurações singulares (quando o determinante da matriz J_q é nulo). Consideram-se restrições físicas, os cursos dos atuadores, comprimentos das peças, faixa de deslocamento das juntas e interferência entre membros ativos e passivos.

Há duas abordagens normalmente seguidas para se avaliar espaços de trabalho: aquela baseada na discretização e a geométrica. O método baseado na discretização considera que o espaço de trabalho seja determinado a partir de um sólido ou superfície, cujo tamanho seja superior ao do espaço de trabalho possível e discretizado por um reticulado regular (fig.2.12). Verifica-se para cada um dos nós do reticulado a sua relação de pertinência ao espaço de trabalho, ou seja, se eles violam ou não as restrições cinemáticas e físicas. Consequentemente, a fronteira do espaço de trabalho é formada por um conjunto de nós que tenham pelo menos um vizinho que não pertença ao espaço de trabalho. A precisão de tal método, obviamente, depende do espaçamento entre os nós.

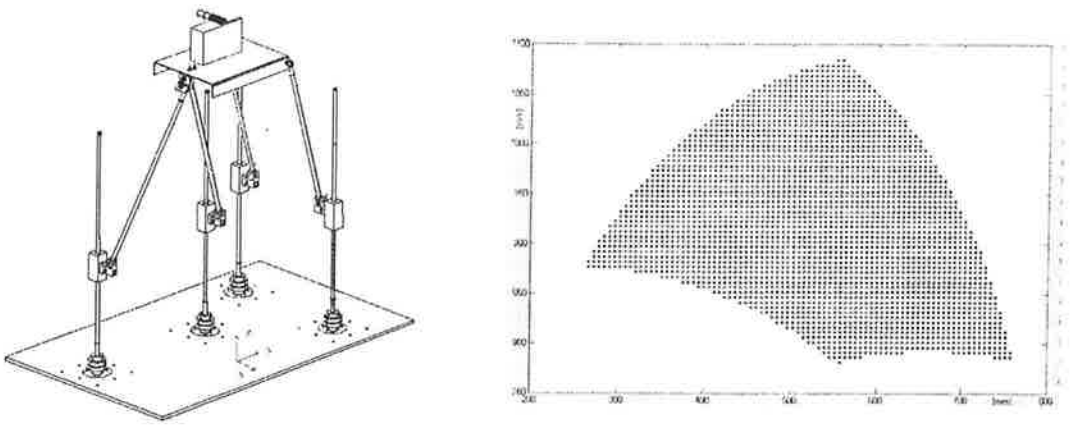


Fig. 2.12 – Mecanismo *2 PRS+2 PUS* e seu espaço de trabalho de translação, determinado a partir do método baseado na discretização (RASZL, 2003)

Diferentemente do método baseado na discretização, a abordagem geométrica é muito mais rápida e precisa. Este método (BONEV; RYU, 2001b, fig.2.13) gera um conjunto de

superfícies ou curvas que são o resultado da intersecção de entidades geométricas primitivas (planos, esferas, cilindros, linhas ou circunferências) caracterizadas pelas restrições cinemáticas e físicas. Contudo, não é uma tarefa fácil generalizar o método geométrico por ser altamente dependente da estrutura cinemática analisada.

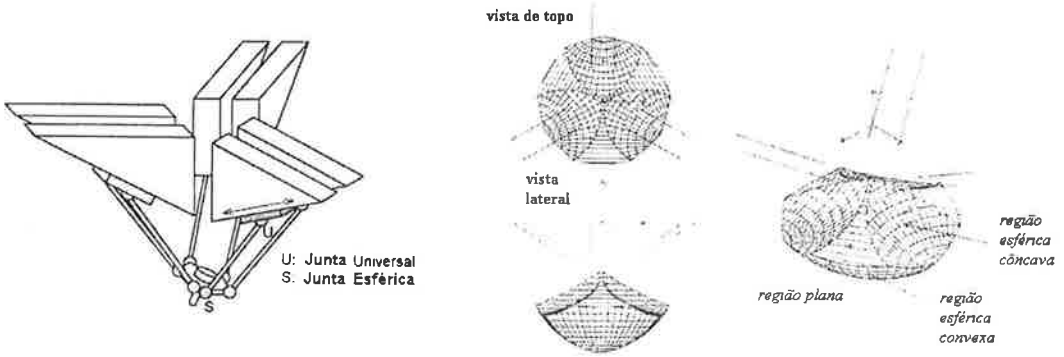


Fig. 2.13 – Mecanismo 6 *PUS* e seu espaço de trabalho de translação, determinado a partir do método geométrico (BONEV; RYU, 2001b).

2.3 Problemas abertos

Em topologia:

- Dada a mobilidade e os tipos de movimentos especificados para a plataforma móvel, como determinar um grupo de estruturas cinemáticas paralelas candidatas que satisfaçam tais requisitos?
- Como comparar arquiteturas paralelas diferentes? Qual é a estrutura mais adequada para uma aplicação específica?
- Uma maior investigação se faz necessária sobre o potencial das estruturas assimétricas que tenham mobilidade 4 ou 5.

Em cinemática:

- Como realizar a cinemática direta e selecionar a pose atual da plataforma móvel em tempo real? (MERLET, 1999)
- Desenvolver um critério de existência para trajetórias livres de singularidades entre duas poses extremas da plataforma móvel. (DASGUPTA; MRUTHYUNJAYA, 2000)
- Como determinar os parâmetros estruturais ótimos de projeto, visando a coincidência entre o espaço de trabalho disponível e o especificado?
- Explorar os mecanismos paralelos redundantes, como estratégia para se evitar as singularidades ao planejar movimentos, dentro do espaço de trabalho disponível.

3 Síntese topológica de uma estrutura cinemática paralela[1]

3.1 Introdução

Em robôs industriais, as arquiteturas predominantes em punhos robóticos utilizam engrenamentos cônicos (fig.3.1), por serem relativamente simples e compactos (TSAI, 1999). ROSHEIM (1989) realizou um extenso levantamento dos mecanismos empregados em diferentes tipos de punhos robóticos. Pode-se dizer que os punhos são responsáveis pela orientação do órgão terminal, conferindo a este três graus de mobilidade. Além disto, são desejáveis as seguintes características para o punho robótico: que o movimento imposto ao órgão terminal seja esférico, que o espaço de trabalho disponível seja amplo, que seus atuadores estejam próximos da base, que sejam compactos, com pouca inércia, de alta rigidez e precisão, etc (TSAI, 1999). Dependendo do tipo de punho, os ângulos de *arfagem* ("pitch"), *guinada* ("yaw") e *rolamento* ("roll") são empregados para definir o tamanho do espaço de trabalho. Segundo ROSHEIM (1989), os deslocamentos máximos correspondentes aos ângulos de arfagem, guinada e rolamento são, respectivamente, 180, 180 e 360 graus. Com relação aos punhos convencionais, normalmente são classificados em dois tipos: arfagem-guinada-rolamento e rolamento-arfagem-rolamento (fig.3.2).

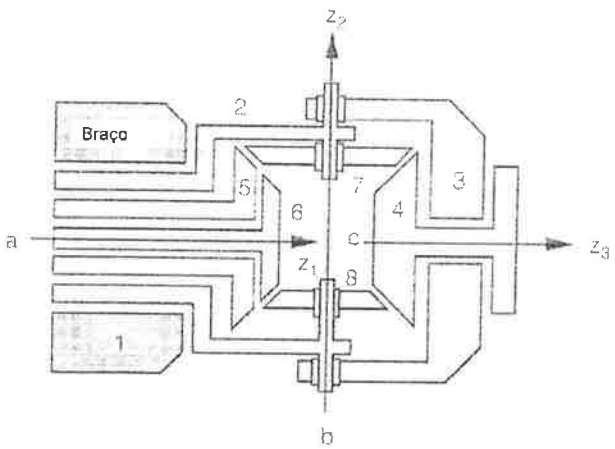


Fig. 3.1- Mecanismo de punho da Bendix. (TSAI, 1999)

[1] Parte do conteúdo deste capítulo foi publicado na 28th Conference on Robotics and Mechanisms (HESS-COELHO, 2004a) e será também publicado no vol. 128, No. 1, do Journal of Mechanical Design (HESS-COELHO, 2006).

Dentre os requisitos mencionados, um punho com estrutura cinemática paralela pode satisfazer a maioria deles com exceção de um espaço de trabalho relativamente amplo (MERLET, 2000). No entanto, algumas aplicações não-industriais, por exemplo, cirúrgicas e prostéticas, não necessitam de tais espaços de trabalho, mas de precisão e baixo peso, respectivamente.

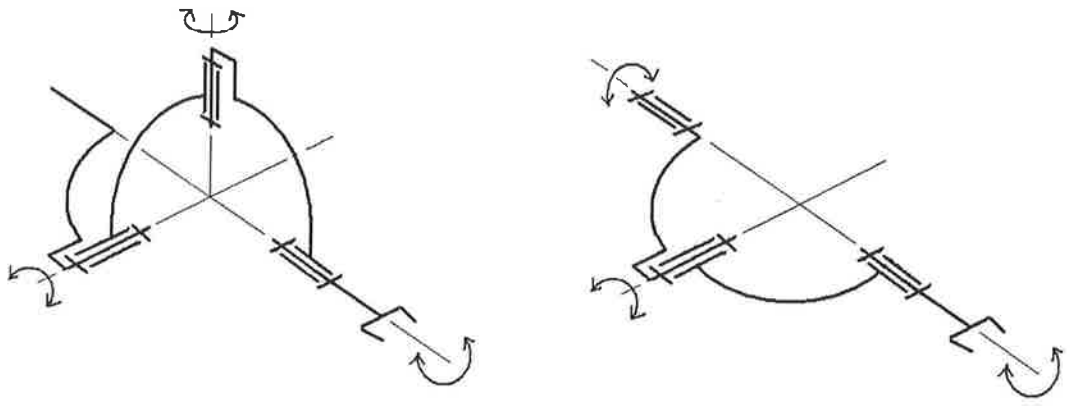


Fig.3.2 – Pulsos convencionais: (a) arfagem-guinada-rolamento e (b) rolamento-guinada-rolamento.

Em trabalhos anteriores que apresentaram estruturas paralelas esféricas como arquiteturas alternativas para o projeto de um punho robótico, alguns autores propuseram a utilização de mecanismos não-redundantes (GOSSELIN et al., 1995, TESAR; BUTLER, 1989, DI GREGORIO, 2001, KAROUIA; HERVÉ, 2000, 2002a, 2002c, WIITALA; STANISIC, 2000) e redundantes (KURTZ; HAYWARD, 1992, LEGUAY-DURAND; REBOULET, 1997, WANG; GOSSELIN, 2004).

De modo a se projetar um mecanismo paralelo para uma aplicação específica, a síntese topológica desempenha um papel importante. A síntese topológica é um processo que tem por objetivo determinar a estrutura cinemática mais adequada que satisfaça a mobilidade necessária e os tipos de movimentos independentes para o órgão terminal. Ela constitui-se na primeira fase dentro do projeto e precede a síntese dimensional, a análise dinâmica e o controle (OLSON et al., 1985).

Diferentes abordagens para a geração de topologias têm sido propostas. HERVÉ (1978, KAROUIA; HERVÉ, 2002b, HUYNH; HERVÉ, 2005, ANGELES, J., 2004, MARTÍNEZ; RAVANI, 2003) apresentou a estrutura de grupos algébricos do sistema de deslocamentos, que baseia-se na matemática do grupo de movimento. O método da enumeração de cadeias ativas foi primeiramente proposto por HUNT (1983) e posteriormente estendido por TSAI (1999). Um outro método alternativo baseia-se na teoria das helicóides (FANG, Y.; TSAI, L.-W., 2002, KONG; GOSSELIN, 2004a, 2004b). Apesar do grande número de novas estruturas reveladas pela aplicação destes métodos, existe a necessidade de uma avaliação sistemática das arquiteturas enumeradas, ainda que haja uma certa difficuldade em se comparar duas estruturas cinemáticas diferentes apenas pela inspeção de sua topologia (MERLET, 2002a, 2002b).

A finalidade deste trabalho é apresentar um procedimento qualitativo que permita ao projetista comparar estruturas cinemáticas pertencentes a um grupo de candidatas, tendo em vista o desenvolvimento de um punho robótico paralelo, tornando-o capaz de escolher a mais promissora. O procedimento proposto compõe-se de três etapas: a geração de topologias adotando-se alguns métodos conhecidos; definição de critérios de ordenação e índices de desempenho; escolha da arquitetura melhor classificada. Após a determinação da melhor estrutura dentre as candidatas selecionadas, o seu comportamento cinemático será avaliado com respeito aos requisitos desejáveis para um punho robótico.

3.2 Métodos para geração das topologias e seleção das arquiteturas candidatas

De modo a selecionar possíveis arquiteturas para um punho com estrutura cinemática paralela, foram adotados os métodos da *enumeração de cadeias ativas* e o *da adição de uma cadeia passiva*. Considerando que o punho deve executar três rotações independentes, então M é igual a três.

Com relação à nomenclatura, esta segue a convenção normalmente empregada para estruturas paralelas. Desta forma, as letras R, P, U e S significam juntas de rotação,

prismáticas, universais e esféricas, respectivamente, sendo que quando estiver sublinhada representa uma junta ativa. Se o sinal de adição ("+") aparecer entre diferentes tipos de membros, então a estrutura considerada será topologicamente assimétrica. Neste trabalho, o símbolo "$\wedge$" significa que a arquitetura representada é do tipo híbrido. Assim, a porção da estrutura que aparecer entre parênteses à esquerda do "$\wedge$" será paralela, enquanto que a porção à direita daquele símbolo será serial.

A tabela 3.1 apresenta as arquiteturas obtidas pela aplicação dos métodos de geração de topologias adotados. A plataforma móvel de cada uma das seguintes estruturas executa três rotações independentes: *3 $\underline{R}RR$* (GOSSELIN et al., 1995, TESAR; BUTLER, 1989), *3 $U\underline{P}U$* (KAROUIA, M.; HERVÉ, J.M., 2000), *3 $\underline{R}UU$* (DI GREGORIO, 2001, KAROUIA; HERVÉ, 2002c) e *3 $\underline{R}RS$* (KAROUIA; HERVÉ, 2002a, DI GREGORIO, 2004), devido às peculiares condições geométricas indicadas na fig.3.3; *3 $\underline{R}US + S$* e *3 $\underline{R}US + UR$*, por causa da adição dos membros passivos *S* e *UR*, respectivamente. Contudo, a estrutura *3 $R\underline{P}S$* possibilita que sua plataforma realize apenas dois movimentos de rotação e um de translação independentes. Consequentemente, esta arquitetura é modificada de modo a fornecer três graus de mobilidade de orientação. Outras arquiteturas também são alteradas de tal maneira que atinjam os requisitos do projeto do pulso de maneira satisfatória. A tabela 3.2 contém todas as estruturas modificadas.

A figura 3.3 apresenta as possíveis estruturas para o punho robótico paralelo. Na figura 3.3 (a–i) encontram-se as arquiteturas originariamente obtidas pelo método da enumeração de cadeias ativas; na fig. 3.3 (j–m), as geradas pela emprego do método de adição de uma cadeia passiva, na fig. 3.3 (n,o), outras estruturas extraídas da literatura (TAKEDA et al., 1996, KURTZ; HAYWARD, 1992). Na maioria das estruturas selecionadas, os pontos centrais das juntas que se localizam nas extremidades dos membros periféricos correspondem aos vértices de triângulos equiláteros, tanto da plataforma móvel como da base. Por outro lado, em membros centrais, os pontos centrais das juntas que localizam-se nas extremidades destes

membros correspondem aos centros geométricos tanto do triângulo da base como da plataforma móvel.

As quinze estruturas cinemáticas, apresentadas na figura 3.3, constituem-se em uma amostra representativa de arquiteturas candidatas para um punho robótico paralelo.

Tabela 3.1 – Arquiteturas geradas e suas propriedades

Método de Geração	λ	C_T	**No. de membros ativos m**	**Conectividade C_k do membro ativo k**	**Membro ativo**	**Membro passivo**	**Arquitetura gerada**
Enum. de cadeias ativas	3	9	3	3	RRR	nenhum	3 RRR
Enum. de cadeias ativas	6	15	3	5	UPU	nenhum	3 UPU
					RUU	nenhum	3 RUU
					RRS	nenhum	3 RRS
					RPS	nenhum	3 RPS
Adição de uma cadeia passiva	6	21	3	6	RUS	S	3 RUS + S
						UR	3 RUS + UR

Tabela 3.2 – Arquiteturas modificadas de modo a melhor satisfazer os requisitos de projeto do punho

Arquitetura gerada	**membro acrescentado**	**Arquitetura modificada**
3 RRR	R	(3 RRR) ^ R
3 RRR	RUR	3 RRR + RUR
3 RPS	R	(3 RPS) ^ R
3 RPS	RUPR	3 RPS + RUPR
3 RUU	R	(3 RUU) ^ R
3 RUS + S	R	(3 RUS + S) ^ R
3 RUS + UR	R	3 RUS + RUR

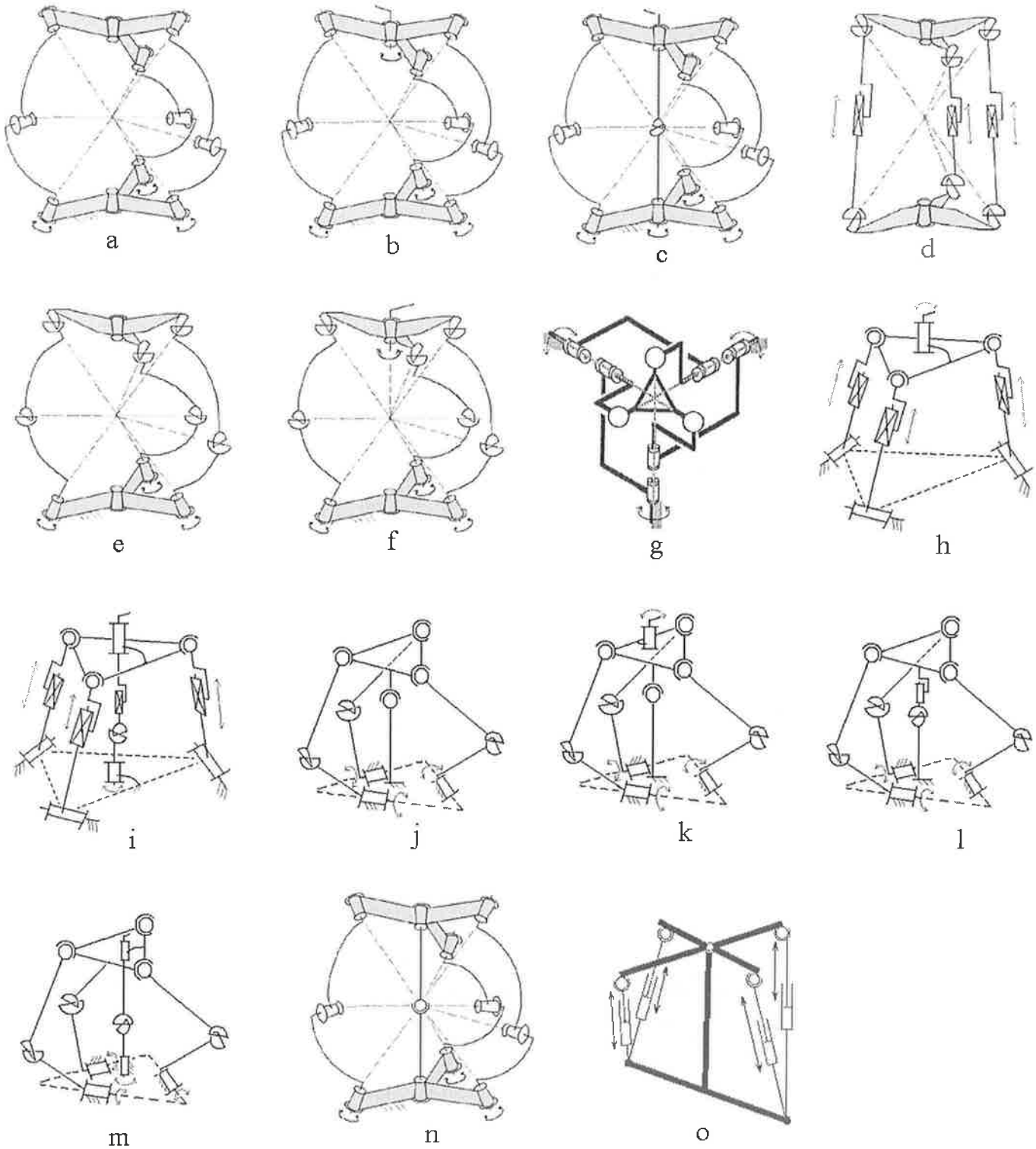


Fig. 3.3 - Arquiteturas possíveis: (a) *3 RRR*, (b) *(3 RRR) ^ R*, (c) *3 RRR + RUR*, (d) *3 UPU*, (e) *3 RUU*, (f) *(3 RUU)^R*, (g) *3 RRS*, (h) *(3 RPS) ^R*, (i) *3 RPS + RUPR*, obtidas pela aplicação do método de enumeração de cadeias ativas; (j) *3 RUS + S*, (k) *(3 RUS + S) ^ R*, (l) *3 RUS + UR*, (m) *3 RUS + RUR*, geradas a partir do método de adição de uma cadeia passiva; (n) *3RRR+S* , (o) *4 SPS + S* outras arquiteturas extraídas da literatura.

3.3 Critérios para ordenação

São propostos alguns critérios para ordenação das arquiteturas geradas. Em primeiro lugar, uma arquitetura paralela deve apresentar *baixa complexidade estrutural*. Assim, de modo a avaliar esta característica, duas medidas podem ser tomadas: verificar se a estrutura é simétrica e calcular a soma de todas as juntas e peças (OLSON et al., 1985, JIN; YANG, 2004). Uma estrutura cinemática é dita topologicamente simétrica quando todos os seus membros tenham o mesmo tipo, número e seqüência de juntas (TSAI, 1999). Surgem algumas vantagens pelo fato de uma estrutura ser simétrica. Por exemplo, os modelos cinemático e dinâmico tornam-se menos complexos. Outros benefícios incluem a redução do custo total devido à utilização do mesmo tipo de atuadores em todos os membros e, conseqüentemente, do seu controle. Além do mais, uma arquitetura com um grande número de juntas e peças aumenta os custos de fabricação e montagem, o que a torna menos viável.

Além de uma baixa complexidade estrutural, uma estrutura cinemática paralela deve possuir juntas que permitam uma *ampla faixa de deslocamento*. Esta característica sempre resulta numa ampliação do espaço de trabalho do mecanismo (MERLET, 1999). As juntas esféricas e universais disponíveis comercialmente, de modo geral, apresentam sua faixa de deslocamento menor do que as de rotação, prismáticas e cilíndricas. Então, uma outra medida para comparação entre arquiteturas é calcular o número de juntas esféricas e universais presentes.

Um outro critério é a *localização remota dos atuadores*, o que significa que os atuadores encontram-se instalados na ou junto à base. Conseqüentemente, as peças pode ser mais leves, os atuadores menos potentes e o comportamento dinâmico do órgão terminal é aprimorado (TSAI, 1999).

Além disto, o órgão terminal deve executar *movimento esférico*. Esta propriedade causa o desacoplamento entre a posição (translações) do centro do punho e orientação (rotações) do órgão terminal, o que simplifica a análise do robô.

A *redundância* também desempenha um papel importante. Enquanto que esta característica ajuda a evitar obstáculos em robôs seriais, ela permite que os robôs paralelos aumentem seus espaços de trabalho e lidem com configurações singulares (MERLET, 2002a, VALASEK et al., 2004, KIM et al., 1999). Para verificar se a estrutura cinemática é redundante ou não, deve-se observar se o número de atuadores é maior do que os graus de mobilidade para orientar o órgão terminal.

Tabela 3.3 – Baixa complexidade estrutural (b.c.e.)

Arquitetura	Simetria		juntas+peças		Índice b.c.e.
	status	índice de simetria	status	índice j+p	
3 RRR	sim	5	17	5	5
3 RRR ^ R	não	1	19	5	3
3 RRR + RUR	não	1	22	1	1
3 UPU	sim	5	17	5	5
3 RUU	sim	5	17	5	5
(3 RUU) ^ R	não	1	19	5	3
3 RRS	sim	5	17	5	5
(3 RPS) ^ R	não	1	19	5	3
3 RPS + RUPR	não	1	24	1	1
3 RUS + S	não	1	18	5	3
(3 RUS + S) ^ R	não	1	20	1	1
3 RUS + UR	não	1	20	1	1
3 RUS + RUR	não	1	22	1	1
3 RRR + S	não	1	18	5	3
4 SPS + S	não	1	23	1	1
		média	19.5		

Tabela 3.4 – Presença de juntas de ampla faixa de deslocamento (j.a.f.d.)

Arquitetura	status S+U	índice j.a.f.d.
3 RRR	0	5
(3 RRR) ^ R	0	5
3 RRR + RUR	1	5
3 UPU	6	1
3 RUU	6	1
(3 RUU) ^ R	6	1
3 RRS	3	5
(3 RPS) ^ R	3	5
3 RPS + RUPR	4	5
3 RUS + S	7	1
(3 RUS + S) ^ R	7	1
3 RUS + UR	7	1
3 RUS + RUR	7	1
3 RRR + S	1	5
4 SPS + S	9	1
média	4.5	

3.4 Ordenação qualitativa

Nesta seção, desenvolve-se a ordenação qualitativa das arquiteturas selecionadas de acordo com os cinco critérios definidos anteriormente. Isto é realizado a partir de cinco matrizes de decisão, representadas pelas tabelas 3.3 a 3.7, cuja primeira coluna contém as arquiteturas selecionadas e as seguintes, as medidas correspondentes para cada critério. Cada medida representa o *status* de uma arquitetura, que expressa como ela atende o critério considerado. Então, associado com o status da arquitetura, há um índice que corresponde a duas notas possíveis: 1 ou 5. Assim, o valor inferior, 1, é atribuído à arquitetura que não atende ao critério e o maior valor, 5, é dado à arquitetura que atende o mesmo critério. Por exemplo, na tabela 3.7, a arquitetura *3 RRR* não é redundante, desta forma, seu status é *não*, então seu índice de redundância é 1. Por outro lado, a estrutura cinemática *3 RRR + RUR* é redundante, então seu status é *sim* e, conseqüentemente, recebe a nota mais alta: 5. No caso em que o status represente uma quantidade, por exemplo, o *número de juntas e peças* (J+P),

um valor médio dos status das arquiteturas selecionadas pode ser calculado. Assim, a nota 5 é atribuída às estruturas cujos status sejam iguais ou inferiores do que o valor médio e a nota 1 é dada àquelas cujos status sejam superiores à média.

Tabela 3.5 – Localização remota dos atuadores (l.r.a.)

Arquitetura	status	Índice l.r.a.
3 RRR	sim	5
(3 RRR) ^ R	não	1
3 RRR + RUR	sim	5
3 UPU	sim	5
3 RUU	sim	5
(3 RUU) ^ R	não	1
3 RRS	sim	5
(3 RPS) ^ R	não	1
3 RPS + RUPR	sim	5
3 RUS + S	sim	5
(3 RUS + S) ^ R	não	1
3 RUS + UR	sim	5
3 RUS + RUR	sim	5
3 RRR + S	sim	5
4 SPS + S	sim	5

Tabela 3.6 – Movimento esférico (m.e.)

Arquitetura	Status	índice m.e.
3 RRR	sim	5
(3 RRR) ^ R	sim	5
3 RRR + RUR	sim	5
3 UPU	sim	5
3 RUU	sim	5
(3 RUU) ^ R	sim	5
3 RRS	sim	5
(3 RPS) ^ R	não	1
3 RPS + RUPR	não	1
3 RUS + S	sim	5
(3 RUS + S) ^ R	sim	5
3 RUS + UR	sim	5
3 RUS + RUR	sim	5
3 RRR + S	sim	5
4 SPS + S	sim	5

Tabela 3.7 – Redundância (red.)

Arquitetura	status	Índice red.
3 RRR	não	1
(3 RRR) ^ R	sim	5
3 RRR + RUR	sim	5
3 UPU	não	1
3 RUU	não	1
(3 RUU) ^ R	sim	5
3 RRS	não	1
(3 RPS) ^ R	sim	5
3 RPS + RUPR	sim	5
3 RUS + S	não	1
(3 RUS + S) ^ R	sim	5
3 RUS + UR	não	1
3 RUS + RUR	sim	5
3 RRR + S	não	1
4 SPS + S	sim	5

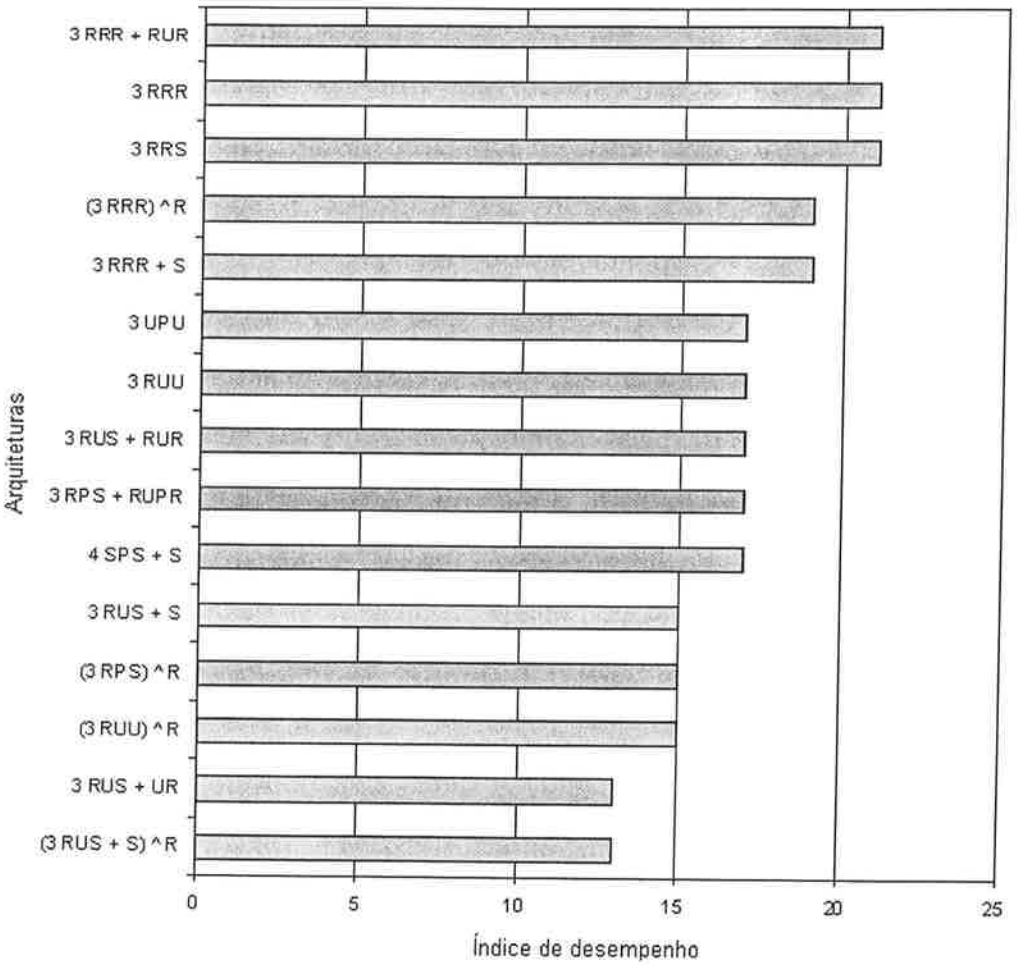


Fig. 3.4 – Arquiteturas ordenadas de acordo com seus índices de desempenho.

Depois de atribuir as notas às arquiteturas selecionadas, os índices de cada um dos critérios são somados, resultando nos respectivos índices de desempenho que possibilitam a ordenação das arquiteturas (fig.3.4).

Três arquiteturas obtiveram os maiores índices de desempenho, *3 RRR*, *3 RRS* e *3 RRR + RUR*. Esta última foi escolhida devido às suas características de redundância e baixa assimetria. A arquitetura escolhida *3 RRR + RUR* (fig. 3.3c) corresponde a uma estrutura paralela esférica redundante que contém quatro atuadores e apenas uma única junta universal.

4 Avaliação do desempenho da arquitetura escolhida[2]

O método de síntese topológica, apresentado no capítulo anterior, recomendou a estrutura cinemática paralela *3 RRR + RUR* como uma das mais adequadas para a aplicação de punho robótico. Neste capítulo, avalia-se o seu desempenho considerando-se como critérios o espaço de trabalho disponível e a eventual presença de configurações singulares neste mesmo espaço. Para tanto, são desenvolvidos dois modelos, um teórico e o outro experimental para determinação do seu comportamento cinemático quanto aos critérios mencionados.

4.1 Modelagem teórica: cinemática de posição

O objetivo da cinemática de posição é determinar as expressões matemáticas que relacionem as coordenadas do órgão terminal, φ_1, φ_2, φ_3 e φ_4, cuja orientação é definida pelo sistema de referência $\{F\}$, as coordenadas θ_1, θ_2, θ_3 e θ_4, que correspondem aos deslocamentos impostos pelos atuadores (fig.4.1), bem como os parâmetros estruturais geométricos. Considerando-se que a estratégia de controle adotada é desenvolvida no espaço das juntas, apenas a cinemática inversa será necessária. Desta forma, as variáveis φ_1, φ_2, φ_3 e φ_4 são admitidas conhecidas enquanto que as variáveis θ_1, θ_2, θ_3 e θ_4 são incógnitas.

$$T: \varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \varphi_4 \rightarrow \theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4$$

Como três dos quatro membros presentes são idênticos, a cinemática de posição da cadeia *RRR* pode ser executada conforme descrito a seguir. A análise se inicia com a adoção de quatro sistemas de referência imóveis, $\{A\}$ e $\{B_i\}$, fixos à base e cinco sistemas de referência locais, $\{C_i\}$ e $\{E\}$, $\{F\}$, vinculados às peças móveis.

---

[2] Parte do conteúdo deste capítulo foi publicado na 28th Conference on Robotics and Mechanisms (HESS-COELHO, 2004b) e encontra-se em revisão para publicação no Journal of Mechanical Design.

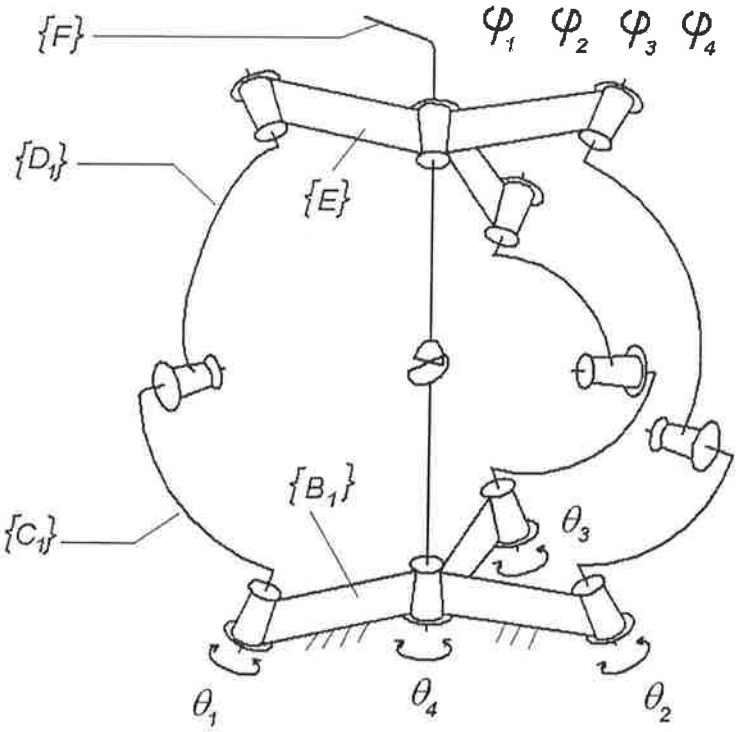
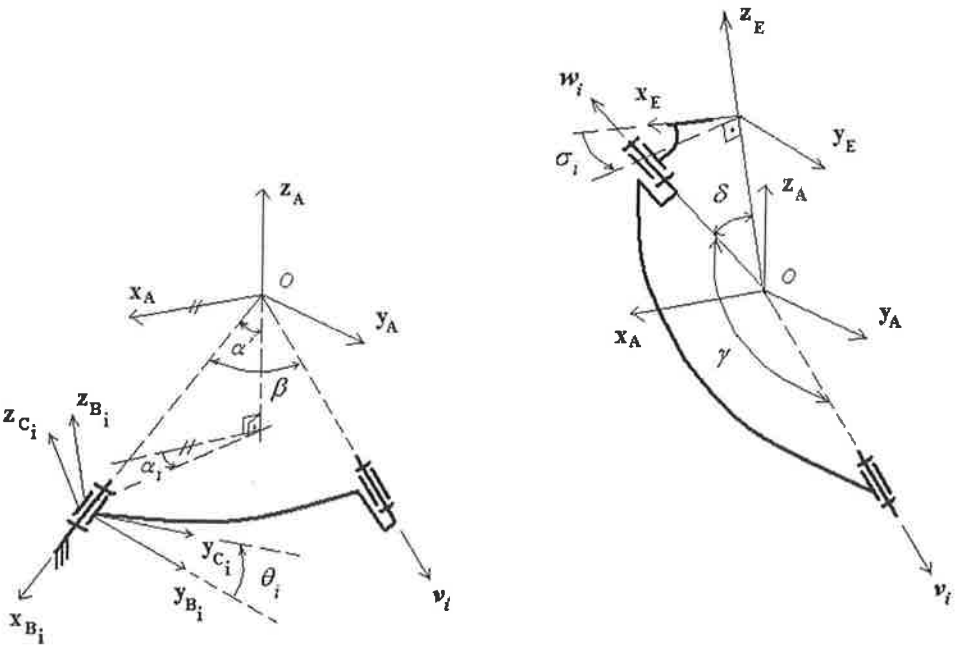


Fig. 4.1 – Indicação da nomenclatura adotada para modelagem do *3 RRR + RUR*.



(a) (b)

Fig. 4.2 – Notação para a análise do i-ésimo membro *RRR*.

A figura 4.2 apresenta o i-ésimo membro $\underline{R}RR$, os referenciais escolhidos, os parâmetros geométricos e as incógnitas. Todas as peças móveis executam movimento esférico ao redor de um mesmo ponto O, denominado centro do punho. Então, todos os sistemas de referência podem ser descritos pela sua orientação. ${}^{A}_{E}\boldsymbol{R}$ representa a matriz de rotação da plataforma móvel $\{E\}$ com respeito à base $\{A\}$. Há várias formas de se construir tal matriz, que depende dos ângulos de Euler selecionados para representar a orientação de $\{E\}$ no espaço tridimensional (TSAI, 1999). A eq. (4.1) define a sequência escolhida das rotações da plataforma móvel em torno dos eixos x , y e z em relação a $\{A\}$.

$$ {}^{A}_{E}\boldsymbol{R} = \boldsymbol{R}(\varphi_2, y_A)\boldsymbol{R}(\varphi_1, x_A)\boldsymbol{R}(\varphi_3, z_A) \tag{4.1} $$

sendo que

$$ \boldsymbol{R}(\varphi_3, z_A) = \begin{bmatrix} c\varphi_3 & -s\varphi_3 & 0 \\ s\varphi_3 & c\varphi_3 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{4.2} $$

$$ \boldsymbol{R}(\varphi_1, x_A) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c\varphi_1 & -s\varphi_1 \\ 0 & s\varphi_1 & c\varphi_1 \end{bmatrix} \tag{4.3} $$

$$ \boldsymbol{R}(\varphi_2, y_A) = \begin{bmatrix} c\varphi_2 & 0 & s\varphi_2 \\ 0 & 1 & 0 \\ -s\varphi_2 & 0 & c\varphi_2 \end{bmatrix} \tag{4.4} $$

$$ {}^{A}_{E}\boldsymbol{R} = \begin{bmatrix} c\varphi_3 c\varphi_2 + s\varphi_3 s\varphi_2 s\varphi_1 & -s\varphi_3 c\varphi_2 + c\varphi_3 s\varphi_2 s\varphi_1 & s\varphi_2 c\varphi_1 \\ s\varphi_3 c\varphi_1 & c\varphi_3 c\varphi_1 & -s\varphi_1 \\ -c\varphi_3 s\varphi_2 + s\varphi_3 c\varphi_2 s\varphi_1 & s\varphi_3 s\varphi_2 + c\varphi_3 c\varphi_2 s\varphi_1 & c\varphi_2 c\varphi_1 \end{bmatrix} \tag{4.5} $$

O vetor $\boldsymbol{w_i}$ vinculado à plataforma móvel $\{E\}$ pode ser determinado com respeito a $\{A\}$ se φ_1, φ_2, φ_3, σ_i e δ forem conhecidos.

$$^{A}\boldsymbol{w}_i = {}^{A}_{E}\boldsymbol{R}(\varphi_1,\varphi_2,\varphi_3)\,{}^{E}\boldsymbol{w}_i(\sigma_i,\delta) \tag{4.6}$$

sendo que

$$^{E}\boldsymbol{w}_i(\sigma_i,\delta) = \left[c\sigma_i s\delta \quad s\sigma_i s\delta \quad c\delta\right]^T \tag{4.7}$$

Por outro lado, vetor $\boldsymbol{v}_i$ depende de α_i, α', β e θ_i.

$$^{A}\boldsymbol{v}_i = {}^{A}_{B_i}\boldsymbol{R}(\alpha_i,\alpha')\,{}^{B_i}_{C}\boldsymbol{R}(\theta_i)\,{}^{C}\boldsymbol{v}_i(\beta) \tag{4.8}$$

sendo que

$$^{A}_{B_i}\boldsymbol{R}(\alpha_i,\alpha') = \begin{bmatrix} c\alpha_i & -s\alpha_i & 0 \\ s\alpha_i & c\alpha_i & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} c\alpha' & 0 & s\alpha' \\ 0 & 1 & 0 \\ -s\alpha' & 0 & c\alpha' \end{bmatrix} \tag{4.9}$$

$$^{B_i}_{C_i}\boldsymbol{R}(\theta_i) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c\theta_i & -s\theta_i \\ 0 & s\theta_i & c\theta_i \end{bmatrix} \tag{4.10}$$

$$^{C_i}\boldsymbol{v}_i(\beta) = \left[c\beta \quad s\beta \quad 0\right]^T \tag{4.11}$$

Como o ângulo entre os vetores $\boldsymbol{v}_i$ e $\boldsymbol{w}_i$ vale γ, então

$$^{A}\boldsymbol{v}_i^T\,{}^{A}\boldsymbol{w}_i - \cos\gamma = 0 \tag{4.12}$$

Se as expressões dos vetores $\boldsymbol{v}_i$ e $\boldsymbol{w}_i$ forem substituídas na eq. (4.12), então

$$e_i \cdot c\theta_i + f_i \cdot s\theta_i + g_i = 0 \qquad (i=1,2,3) \tag{4.13}$$

sendo que

$$e_i = -s\alpha_i \cdot s\beta \cdot {}^A w_{xi} + c\alpha_i \cdot s\beta \cdot {}^A w_{yi} \tag{4.14}$$

$$f_i = c\alpha_i \cdot s\alpha' \cdot s\beta \cdot {}^A w_{xi} + s\alpha_i \cdot s\alpha' \cdot s\beta \cdot {}^A w_{yi} + c\alpha' \cdot s\beta \cdot {}^A w_{zi} \tag{4.15}$$

$$g_i = c\alpha_i \cdot c\alpha' \cdot c\beta \cdot {}^A w_{xi} + s\alpha_i \cdot c\alpha' \cdot c\beta \cdot {}^A w_{yi} - s\alpha' \cdot c\beta \cdot {}^A w_{zi} - c\gamma \tag{4.16}$$

Os ângulos θ_i $(i=1,2,3)$ são determinados somente se os coeficientes e_i , f_i e g_i forem conhecidos. Há duas soluções matemáticas possíveis para cada um dos três membros, que resulta em até 8 diferentes modos de montagem do mecanismo. De fato, para o i-ésimo membro $\underline{R}RR$, através da seguinte substituição de variáveis,

$$u_i = tg\left(\frac{\theta_i}{2}\right) \tag{4.17}$$

a equação (4.13) se torna uma equação polinomial de 2ª. ordem,

$$(g_i - e_i) \cdot u_i^2 + (2f_i) \cdot u_i + (g_i + e_i) = 0 . \tag{4.18}$$

Como para descrever a orientação do órgão terminal $\{F\}$, são necessárias apenas três das quatro coordenadas mencionadas e, considerando-se que o seu movimento independe do ângulo φ_3, pode-se admitir que este seja nulo. Assim, simplifica-se a matriz ${}^A_E\boldsymbol{R}$.

$${}^A_E R = \begin{bmatrix} c\varphi_2 & s\varphi_2 s\varphi_1 & s\varphi_2 c\varphi_1 \\ 0 & c\varphi_1 & -s\varphi_1 \\ -s\varphi_2 & c\varphi_2 s\varphi_1 & c\varphi_2 c\varphi_1 \end{bmatrix} \tag{4.19}$$

A matriz ${}^A_F R$, que descreve a orientação de $\{F\}$ em relação a $\{A\}$ em termos das coordenadas φ_1, φ_2 e φ_4, pode ser expressa pela eq. (4.20).

$${}^A_F R = {}^A_E R \, {}^E_F R(\varphi_4, z_E) \tag{4.20}$$

A relação entre φ_4 e θ_4 (fig. 4.3) é dada pela eq. (4.21) (GIECK, 1996).

$$\theta_4 = \boldsymbol{arctg}\left(\frac{tg\,\varphi_4}{{}^A\boldsymbol{k}_E{}^T\,{}^A\boldsymbol{k}_A}\right) \tag{4.21}$$

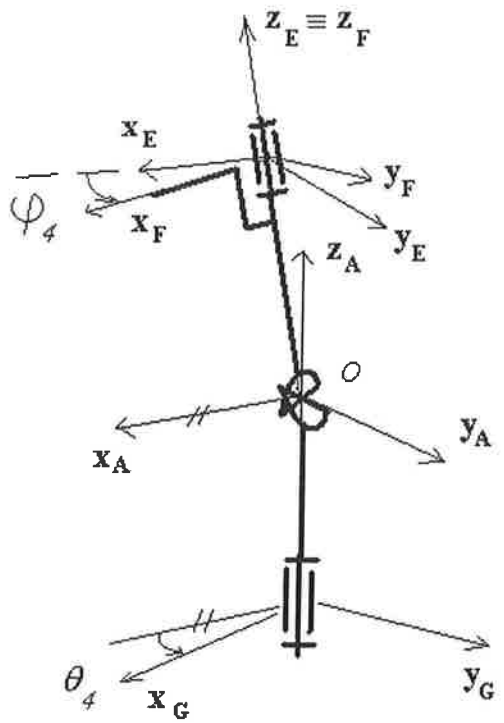


Fig. 4.3 – Notação para a análise do membro *RUR*.

4.2 Configurações singulares

Em configurações singulares, um mecanismo paralelo pode sofrer um travamento ou até mesmo tornar-se incontrolável. De modo a prever tais comportamentos indesejáveis, a matriz jacobiana J_q é calculada, bem como as condições para anulação de seu determinante, que correspondem às situações de ocorrência de singularidades. Para tanto, derivam-se em relação ao tempo as equações (4.13) e (4.21).

$$\frac{d}{dt}\left(e_i \cdot c\theta_i + f_i \cdot s\theta_i + g_i\right) = 0 \qquad (i=1,2,3) \qquad (4.22)$$

$$\dot{\theta}_4 = \frac{d}{dt}\left(arctg\left(\frac{tg\varphi_4}{{}^A k_E{}^T\,{}^A k_A}\right)\right) \qquad (4.23)$$

Ao derivar-se a eq. (4.22), obtem-se

$$\dot{e}_i \cdot c\theta_i + \dot{f}_i \cdot s\theta_i + \dot{g}_i = \left(e_i \cdot s\theta_i - f_i \cdot c\theta_i\right) \cdot \dot{\theta}_i \qquad (i=1,2,3) \qquad (4.24)$$

Ao derivar-se a eq. (4.23), obtem-se

$$[(c\varphi_2 s\varphi_1)tg\theta_4]\cdot\dot{\varphi}_1 + [(s\varphi_2 c\varphi_1)tg\theta_4]\cdot\dot{\varphi}_2 + 0.\dot{\varphi}_3 + \left[\frac{1}{c^2\varphi_4}\right]\cdot\dot{\varphi}_4 = \left[\frac{c\varphi_2 c\varphi_1}{c^2\theta_4}\right]\cdot\dot{\theta}_4 \qquad (4.25)$$

Na sequência, as quatro equações anteriores são rearranjadas de modo a adquirirem a forma da equação matricial

$$J_x\ \dot{\boldsymbol{x}} = J_q\ \dot{\boldsymbol{q}}$$

sendo que

$$\dot{\boldsymbol{x}} = [\dot{\varphi}_1\ \ \dot{\varphi}_2\ \ \dot{\varphi}_3\ \ \dot{\varphi}_4]^T \qquad (4.26)$$

$$\dot{\boldsymbol{q}} = [\dot{\theta}_1\ \ \dot{\theta}_2\ \ \dot{\theta}_3\ \ \dot{\theta}_4]^T \qquad (4.27)$$

$$J_x = \begin{bmatrix} J_{x\ (1,1)} & J_{x\ (1,2)} & J_{x\ (1,3)} & J_{x\ (1,4)} \\ J_{x\ (2,1)} & J_{x\ (2,2)} & J_{x\ (2,3)} & J_{x\ (2,4)} \\ J_{x\ (3,1)} & J_{x\ (3,2)} & J_{x\ (3,3)} & J_{x\ (3,4)} \\ J_{x\ (4,1)} & J_{x\ (4,2)} & J_{x\ (4,3)} & J_{x\ (4,4)} \end{bmatrix} \qquad (4.28)$$

$$J_q = \begin{bmatrix} J_{q\ (1,1)} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & J_{q\ (2,2)} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & J_{q\ (3,3)} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & J_{q\ (4,4)} \end{bmatrix} \qquad (4.29)$$

$$J_{q\ (i,i)} = e_i \cdot s\theta_i - f_i \cdot c\theta_i \qquad (i=1,2,3) \qquad (4.30)$$

Para anulação do determinante da matriz J_q, basta que pelo menos um dos elementos da sua diagonal principal adquirira o valor zero. Observando-se os três primeiros elementos, nota-se que estes se anulam quando os coeficientes e_i e f_i adquirem o valor zero. Assim, admitindo-se que os parâmetros estruturais geométricos α', β, γ, δ, α_i, σ_i sejam conhecidos, podem ser determinadas as componentes x, y e z dos vetores unitários ${}^A\boldsymbol{w}_i$. Uma vez que as componentes destes vetores tenham sido calculadas, determinam-se os ângulos φ_1 e φ_2.

De modo a tornar esta análise mais concreta, as tabelas 4.1 e 4.2 apresentam os parâmetros adotados para a estrutura cinemática paralela considerada. Na seqüência, a tabela

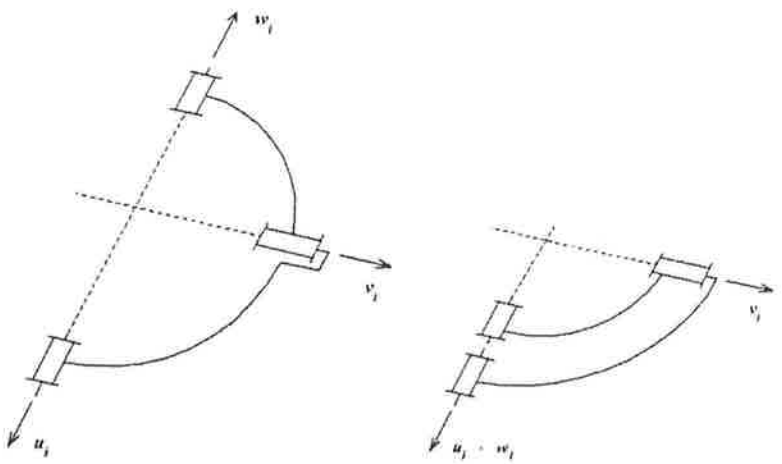
4.3 contém as componentes dos vetores unitários ${}^{A}w_i$ e os ângulos φ_1 e φ_2 correspondentes. A figura 4.4 indica as singularidades associadas ao membros *RRR*..

Tabela 4.1 – Parâmetros estruturais comuns dos membros *RRR*

Parâmetros	(graus)
α'	45
β	90
γ	90
δ	45

Tabela 4.2 - Outros parâmetros correspondentes a cada membro *RRR*

Parâmetros	Membro 1 (graus)	Membro 2 (graus)	Membro 3 (graus)
α_i	0	120	240
σ_i	0	120	240



(a) (b)

Fig. 4.4 – Singularidades do membro *RRR*: (a) primeira solução; (b) segunda solução.

Tabela 4.3 - Configurações singulares para os membros *RRR*

		Membro		
		i=1	*i=2*	*i=3*
	$w_{x\,i}$	$-\frac{\sqrt{2}}{2}$	$\frac{\sqrt{2}}{4}$	$\frac{\sqrt{2}}{4}$
	$w_{y\,i}$	0	$-\frac{\sqrt{6}}{4}$	$\frac{\sqrt{6}}{4}$
1ª. solução	$w_{z\,i}$	$\frac{\sqrt{2}}{2}$	$\frac{\sqrt{2}}{2}$	$\frac{\sqrt{2}}{2}$
	$\varphi_1\,(°)$	*0*	*81,8*	*-81,8*
	$\varphi_2\,(°)$	*-90*	*53,1*	*53,1*
	$w_{x\,i}$	$\frac{\sqrt{2}}{2}$	$-\frac{\sqrt{2}}{4}$	$-\frac{\sqrt{2}}{4}$
	$w_{y\,i}$	0	$\frac{\sqrt{6}}{4}$	$-\frac{\sqrt{6}}{4}$
2ª. solução	$w_{z\,i}$	$-\frac{\sqrt{2}}{2}$	$-\frac{\sqrt{2}}{2}$	$-\frac{\sqrt{2}}{2}$
	$\varphi_1\,(°)$	*0*	*-98,2*	*98,2*
	$\varphi_2\,(°)$	*90*	*0*	*0*

Analogamente, as configurações singulares para o quarto membro, *RUR*, ocorrem quando o elemento *Jq (4,4)* for nulo. A tabela 4.4 e a fig.4.5 apresentam tais configurações.

Tabela 4.4 - Configurações singulares para os membros *RUR*

1ª. solução	$\varphi_1\,(°)$	$\forall$
	$\varphi_2\,(°)$	± 90
2ª. solução	$\varphi_1\,(°)$	± 90
	$\varphi_2\,(°)$	$\forall$

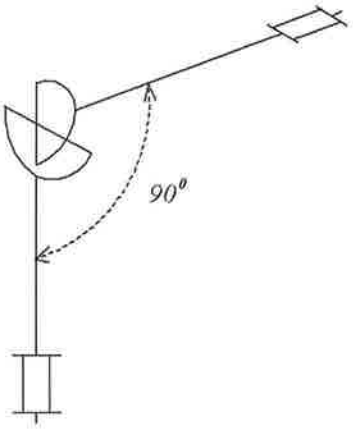


Fig.4.5 – Singularidades do membro *RUR*

4.3 Espaço de trabalho

Os gráficos bidimensionais e tridimensionais são as duas formas empregadas para representar o espaço de trabalho. A seguir, encontram-se gráficos bidimensionais (fig.4.6 e 4.7) que registram o comportamento dos deslocamentos dos três atuadores em função dos ângulos φ_1 e φ_2.

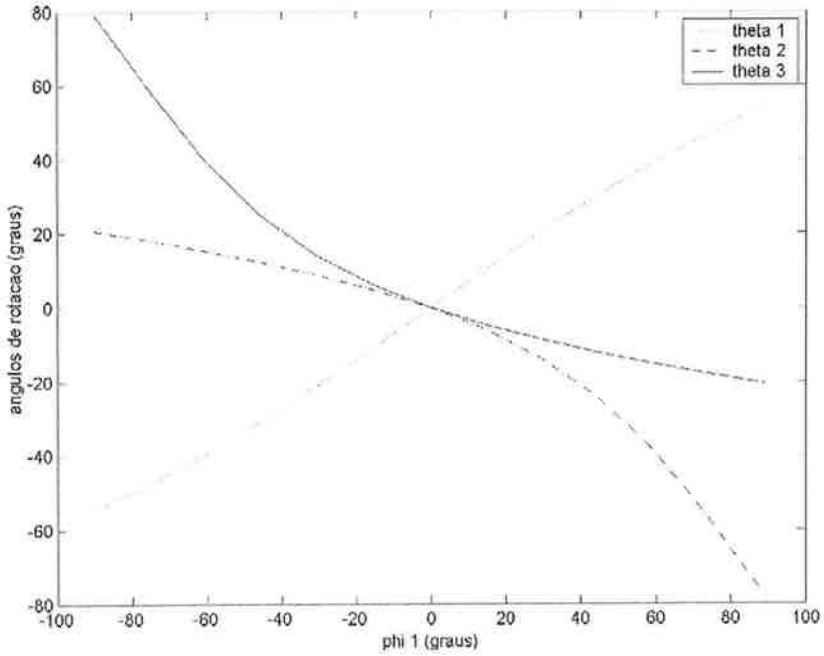


Fig. 4.6 –Espaço de trabalho teórico: comportamento do ângulos dos atuadores 1, 2 e 3 em função do ângulo de orientação φ_1, sendo que φ_2 é nulo.

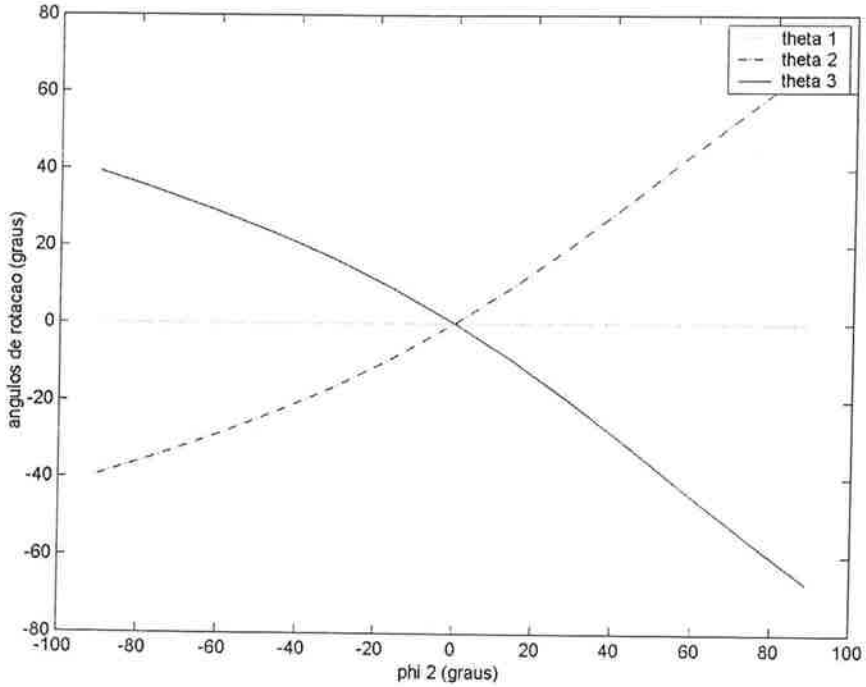
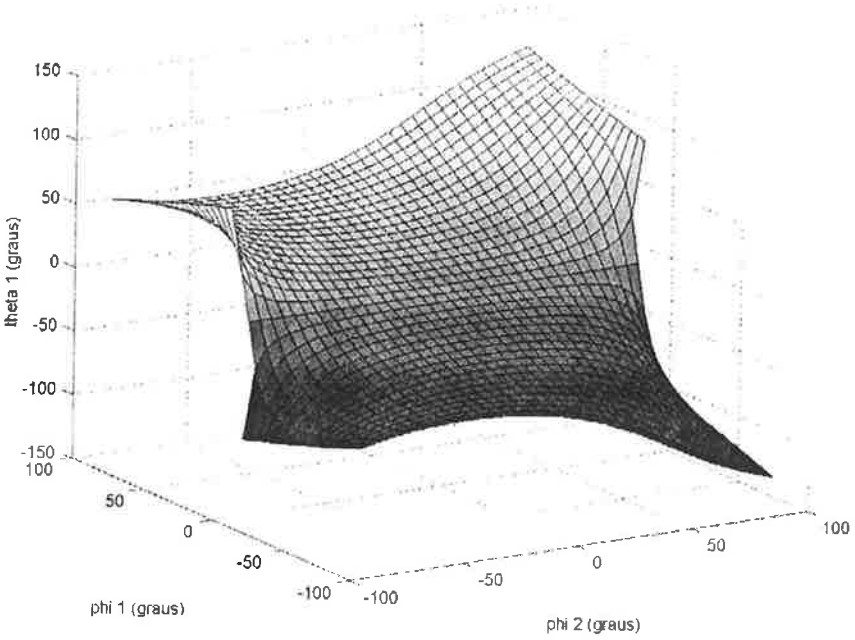
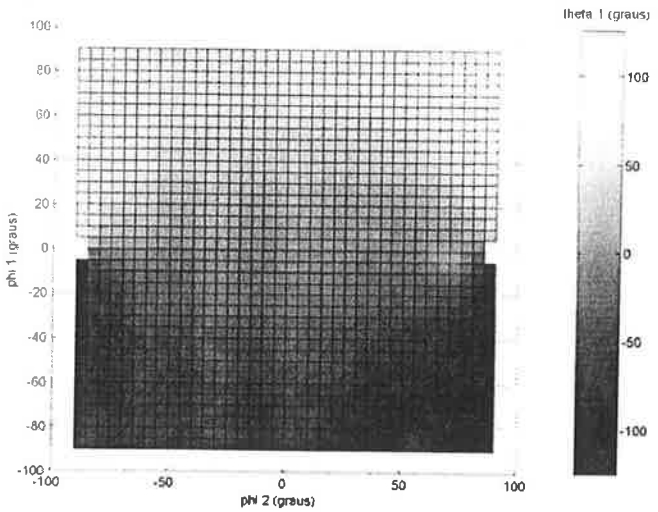


Fig. 4.7 –Espaço de trabalho teórico: comportamento do ângulos dos atuadores 1, 2 e 3 em função do ângulo de orientação φ_2, sendo que φ_1 é nulo.

Com relação aos gráficos tridimensionais, admitiu-se que os ângulos de orientação φ_1 e φ_2 variassem simultaneamente de -90 a 90 graus. No eixo vertical destes gráficos, é possível observar o comportamento dos ângulos dos atuadores (1, 2 e 3).

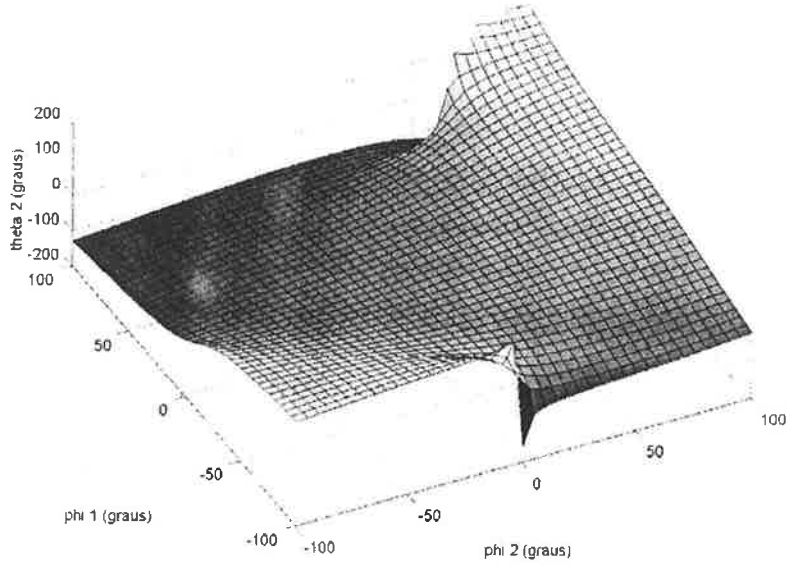


(a)

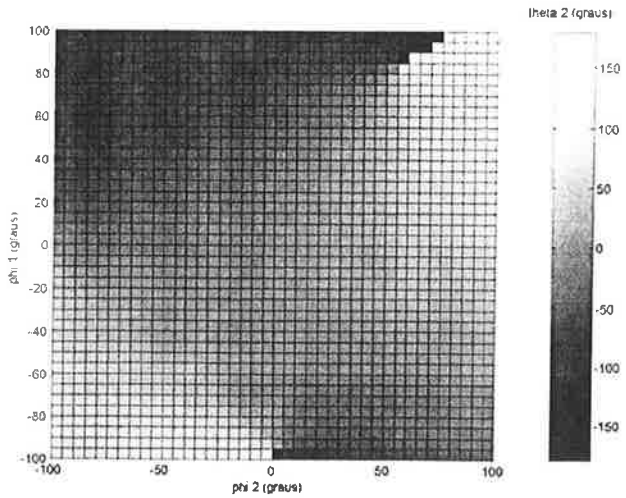


(b)

Fig. 4.8 –Espaço de trabalho teórico: comportamento do ângulo do atuador 1 em função dos ângulos de orientação φ_1 e φ_2, (a) superfície , (b) vista de topo.

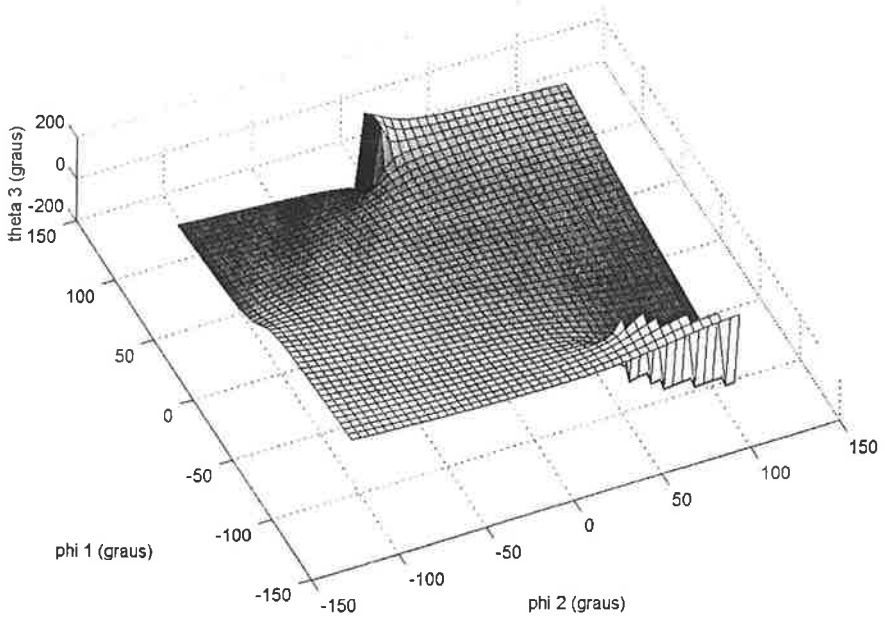


(a)

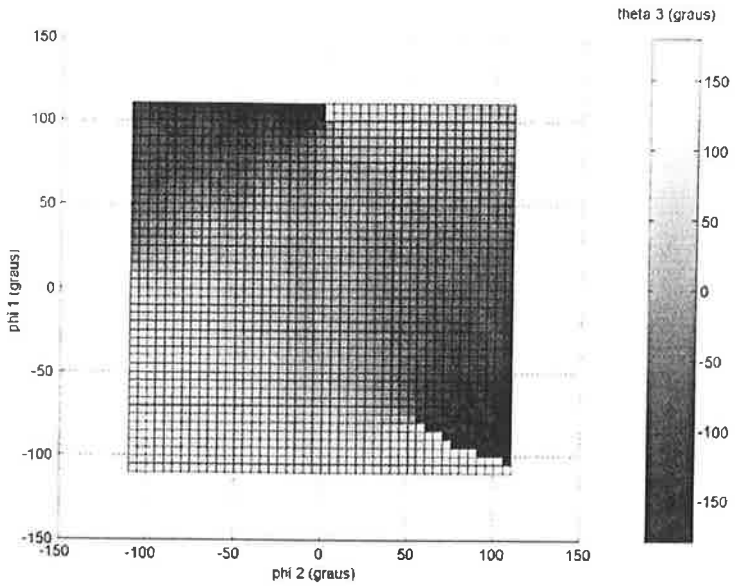


(b)

Fig. 4.9 –Espaço de trabalho teórico: comportamento do ângulo do atuador 2 em função dos ângulos de orientação φ_1 e φ_2, (a) superfície , (b) vista de topo.



(a)



(b)

Fig. 4.10 –Espaço de trabalho teórico: comportamento do ângulo do atuador 3 em função dos ângulos de orientação φ_1 e φ_2, (a) superfície , (b) vista de topo.

Pela observação dos gráficos das fig.4.8, 4.9 e 4.10, notam-se algumas descontinuidades dentro do espaço de trabalho teórico. Estas descontinuidades correspondem às configurações singulares previstas na seção 4.2.

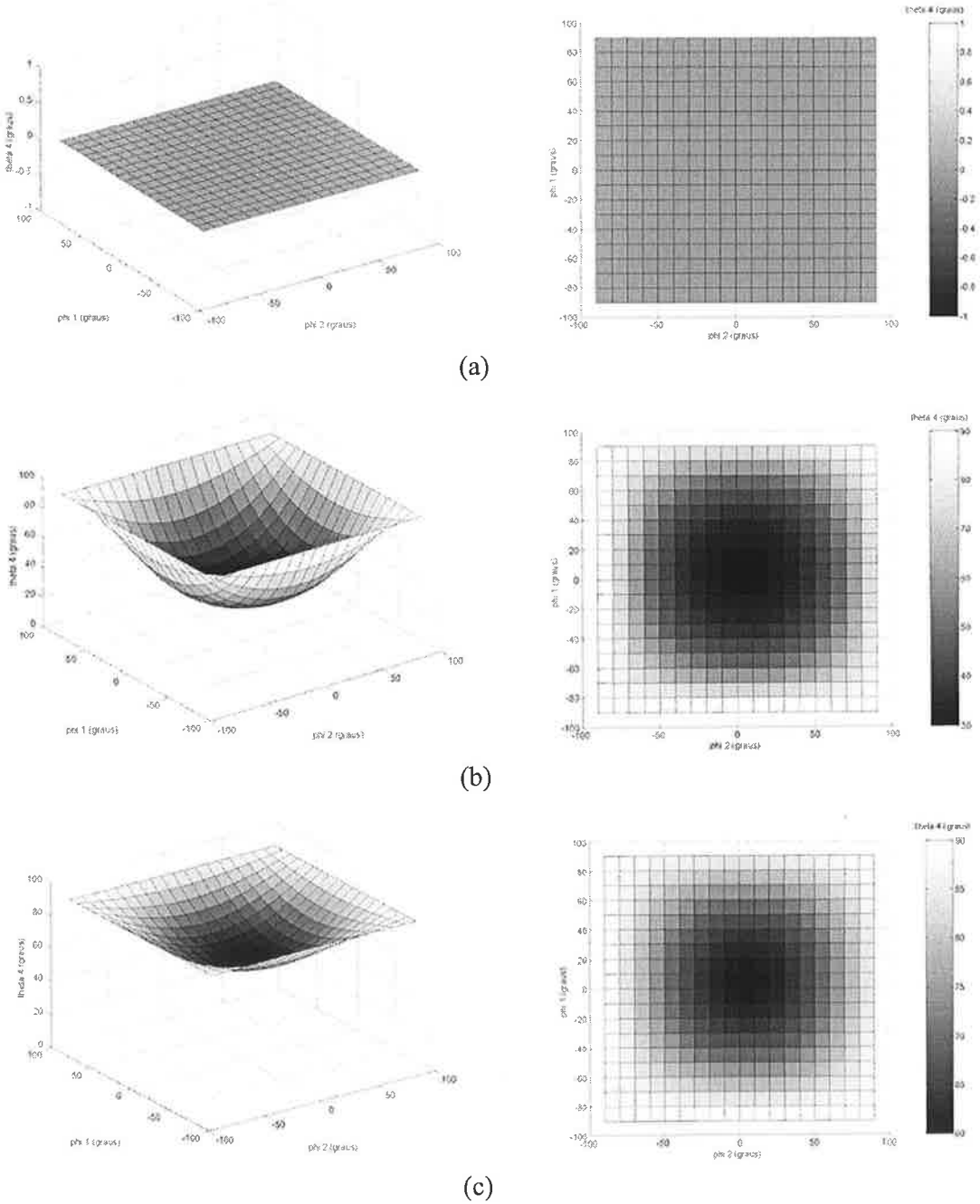


Fig. 4.11 – Espaço de trabalho teórico: comportamento do ângulo do atuador 4 em função dos ângulos de orientação φ_1, φ_2 e φ_4, (a) $\varphi_4 = 0°$, (b) $\varphi_4 = 30°$, (c) $\varphi_4 = 60°$.

Restam ainda ser apresentados os gráficos do comportamento do ângulo θ_4 correspondente ao deslocamento imposto pelo quarto atuador em função dos ângulos de orientação do órgão terminal. Estes encontram-se presentes na fig. 4.11.

A região central dos gráficos anteriores (fig. 4.11) corresponde à configuração em que os ângulos θ_4 e φ_4 coincidem. À medida que órgão terminal se afasta desta região, observa-se que este se aproxima das configurações singulares previstas na tabela 4.4.

4.4 Modelo experimental: protótipo construído

O protótipo construído, mostrado na fig.4.12, é formado pelos seguintes subsistemas: mecânico, atuador, e de controle. O subsistema mecânico compõem-se do próprio mecanismo paralelo, $3\ \underline{R}RR + \underline{R}UR$, que contém uma base fixa, um órgão terminal, e quatro membros ativos. Estes membros contém, construtivamente, peças, elementos de acoplamento, juntas de rotação e universal. Quatro servomotores elétricos de corrente contínua compõem o subsistema atuador. O subsistema de controle inclui um computador PC, um controlador para os servomotores, um cabo de comunicação, programa com interface gráfica para o usuário controlar os servomotores, um modelo de cinemática inversa, escrito em MatLab que calcula os deslocamentos dos atuadores a partir de uma dada seqüência de orientações do órgão terminal. Os servomotores são controlados pela modulação da largura do pulso (PWM) e sua resolução máxima de posicionamento é de 0,36 graus por unidade. Maiores detalhes acerca dos componentes mencionados podem ser encontrados na tabela 4.5 e anexo A.

Tabela 4.5 – Subsistemas do punho robótico

Subsistema	Componente	Características	Material ou fornecedor
Mecânico	Mecanismo *3 RRR + RUR*	Volume aprox. 150x150x150 mm^3	Plexiglas, PVC, aço
Atuador	4 servomotores de corrente contínua HS-300	Deslocamento angular máximo de 180 graus, torque máximo 0.34 N.m, máxima velocidade angular 1 rps	Hitec
Controle	Controlador dos servomotores Mini SSC II	MiniSSC II pode controlar até 8 servos utilizando uma simples interface serial (2400 ou 9600 baud)	Scott Edwards Electronics, Inc.
	Cabo de comunicação SSC-CBL	Cabo de dados serial para computador PC	Scott Edwards Electronics, Inc.
	Programa Mini SSC Panel v1.2	Interface gráfica para o usuário controlar os servomotores	Mister computer
	Computador	Processador AMD 900 MHz, 256 MB RAM, HD 15 GB	Sony
	Modelo de Cinemática Inversa		

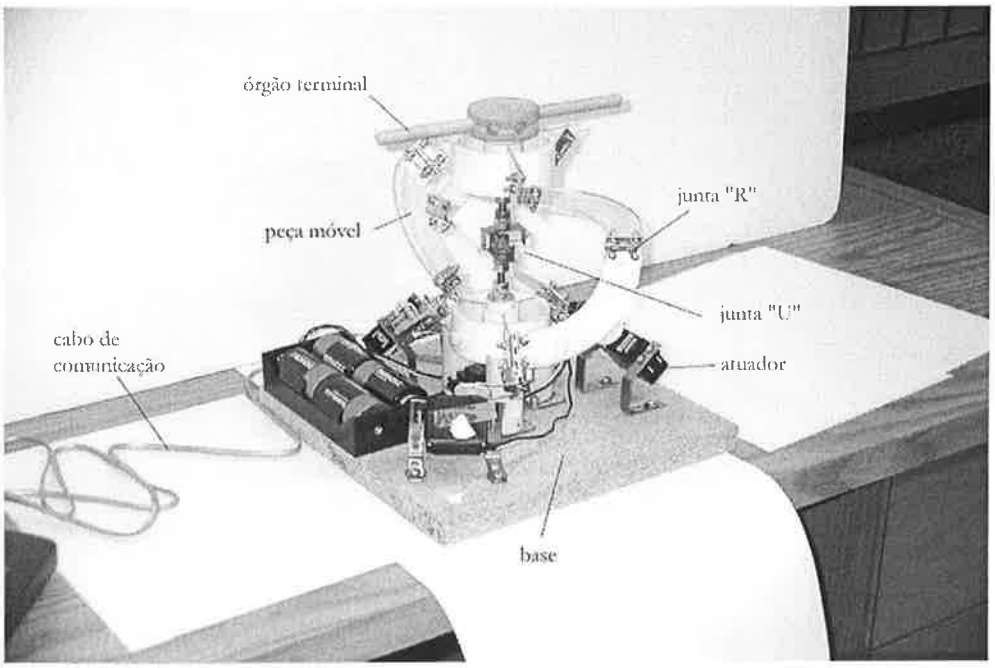


Fig. 4.12 – Protótipo do punho robótico

Com relação ao desempenho alcançado pelo protótipo construído, o gráfico tridimensional (fig. 4.13) indica que as possíveis trajetórias para um ponto pertencente ao órgão terminal podem ser executadas numa calota esférica correspondente aos ângulos de arfagem ou guinada de 120 graus, que é um pouco menor do que o espaço de trabalho teórico. Esta redução é conseqüência dos limites mecânicos impostos pelas juntas de rotação e universal, e a eventual interferência entre peças móveis. Devido a estas razões, o punho robótico não alcança quaisquer configurações singulares previstas dentro do espaço de trabalho. Além disto, a rotação completa do órgão terminal somente é possível devido à presença do membro *RUR* e, conseqüentemente, pela ação do quarto atuador. De fato, a adição deste membro ativo aumenta substancialmente o intervalo de variação do ângulo de rolamento de *120* graus (alcançada apenas na configuração inicial em que φ_1 e φ_2 são iguais a zero) para *180* graus, apenas por limitação do atuador utilizado (fig.4.14). Este limite pode ser elevado para o valor de *360* graus, com o emprego de outros tipos de atuadores.

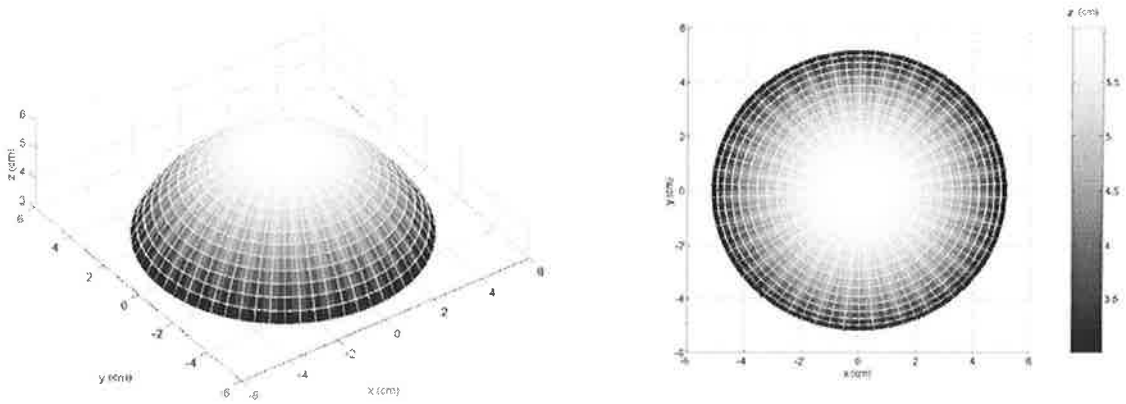
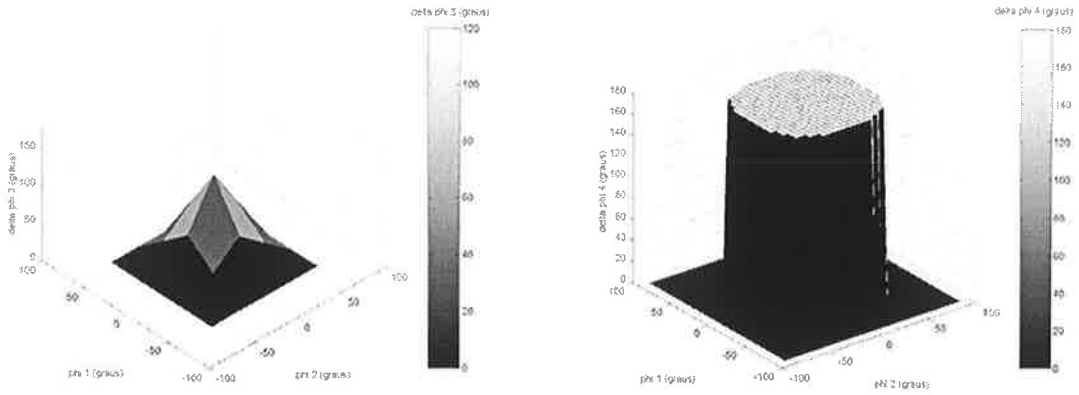


Fig. 4.13 – Espaço de trabalho real: calota esférica correspondente aos ângulos de arfagem ou guinada de 120 graus.



(a) (b)

Fig. 4.14 – Ângulo de rolamento: (a) *3 RRR* e (b) *3 RRR+RUR*.

Ensaios realizados com o protótipo construído, movido pelos quatro atuadores, submeteram o órgão terminal a rotações puras em torno dos eixos x, y e z da base *{A}* pela ação dos atuadores dos membros *RRR* . O intervalo de deslocamento foi de aproximadamente 90 graus (-45 a 45 graus). Além destes ensaios, registrados em fotografias apresentadas na fig. 4.15, o órgão terminal também executou um movimento mais complexo formado por uma rotação em torno do eixo x, seguida por uma rotação do membro *RUR*, condição em que o quarto atuador também foi empregado.

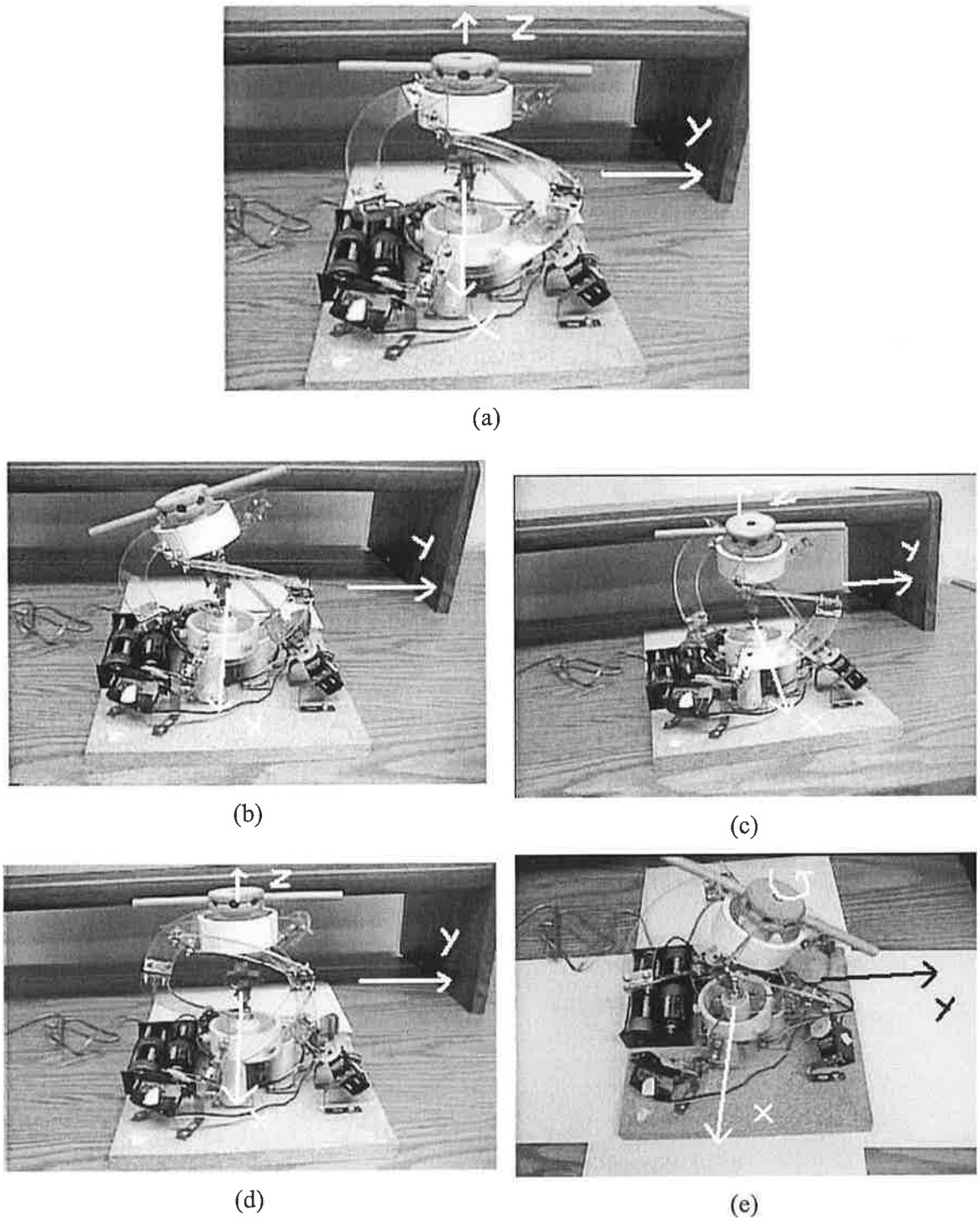


Fig. 4.15 – Ensaios de movimentação do punho: (a) posição inicial, (b) rotação φ_1 em torno do eixo x, (c) rotação φ_2 em torno do eixo y, (d) rotação φ_3 da plataforma móvel em torno do eixo z, (e) rotação em torno do eixo x, seguida de rotação φ_4 do órgão terminal .

5 Discussão

Este trabalho apresentou um procedimento qualitativo para sintetizar um punho robótico paralelo. O procedimento proposto compreende três etapas: geração de topologias de acordo com os requisitos de projeto do punho; definição dos critérios de ordenação e do índice de desempenho; escolha da arquitetura com melhor índice. Durante a etapa de geração de topologias, as arquiteturas selecionadas podem ser modificadas de modo a se tornarem mais adequadas à função-alvo.

Trabalhos publicados anteriormente comentam acerca de uma melhoria no desempenho de mecanismos paralelos, em geral, quando se considera a baixa complexidade estrutural, juntas com faixa de deslocamento ampla, localização remota dos atuadores e redundância. Em particular, isto também pode ser alcançado, para a aplicação de punho robótico, mediante a imposição de um movimento esférico para a plataforma móvel. Estes cinco critérios para ordenar as arquiteturas selecionadas realmente influenciam o comportamento cinemático e dinâmico de punho robótico paralelo, em termos da expansão do espaço de trabalho (MERLET, 1999, 2002a, SCHNYDER et al., 2004), da capacidade de lidar com as singularidades (KURTZ; HAYWARD, 1992, VALASEK et al., 2004, KIM et al., 1999) e de alcançar uma rápida resposta dinâmica (TSAI, 1999).

Até onde é de conhecimento do autor, dentre as 15 estruturas cinemáticas candidatas, sete novas arquiteturas foram geradas: *(3RRR)^R*, *3 RRR + RUR*, *3RUS+RUR*, *(3RUU)^R*, *(3RPS)^R*, *(3RUS+S)^R* e *3RPS+RUPR*. Duas delas estão entre as cinco melhores colocadas após a ordenação. Contudo, a maioria das estruturas híbridas enumeradas apresentaram os menores índices de desempenho.

A escolha dos números 1 e 5 como os menores e maiores valores, respectivamente, para cada critério foi arbitrária, outros números poderiam ter sido adotados. De acordo com a opinião do autor, se estes números não forem tão próximos, surgem algumas vantagens: o projetista perceberá mais facilmente as arquiteturas melhor colocadas ou até mesmo a presença de grupos de arquiteturas com índices de desempenho próximos.

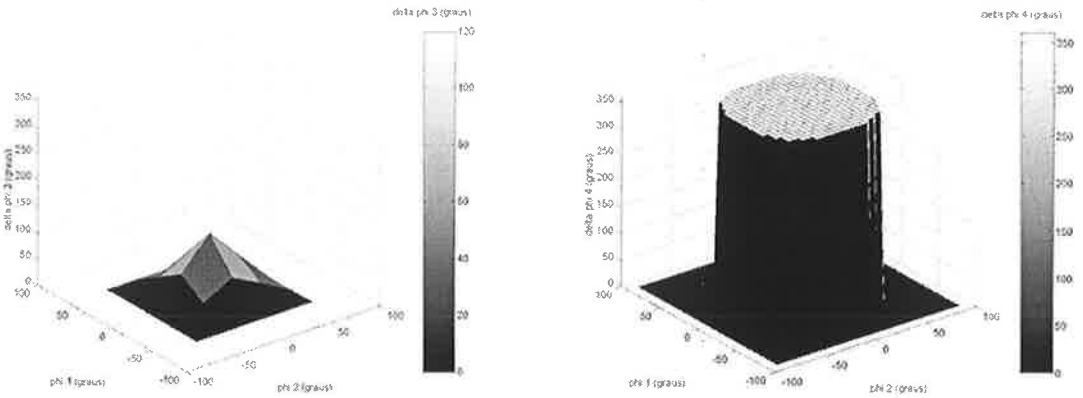
Nesta pesquisa, todos os critérios foram considerados igualmente importantes, desta maneira não há pesos relativos para se calcular o índice de desempenho. A maioria dos critérios são independentes entre si. Os dois únicos antagônicos são a baixa complexidade estrutural e a redundância. Assim, quando um requisito particular tornar-se preponderante para o punho projetado, então um critério será mais relevante do que o outro. Conseqüentemente, pesos diferentes para estes critérios podem ser adotados.

Três arquiteturas alcançaram os maiores índices de desempenho, e uma dentre estas foi escolhida (*3* $\underline{R}RR$ + $\underline{R}UR$) tendo em vista as suas características de redundância e pequena assimetria.

De modo a avaliar o desempenho da arquitetura escolhida, um protótipo movido por quatro atuadores foi construído. Para a melhor compreensão de seu comportamento, a análise cinemática foi desenvolvida. Tal análise permitiu determinar as coordenadas angulares dos atuadores em função das coordenadas especificadas para o órgão terminal. Além disto, foi possível levantar o espaço de trabalho disponível e verificar a eventual presença de configurações singulares neste mesmo espaço.

A estrutura cinemática do punho robótico proposto é uma evolução do mecanismo esférico paralelo *3* $\underline{R}RR$. De fato, a adição do quarto membro ativo $\underline{R}UR$ aumenta substancialmente o intervalo de variação do ângulo de rolamento ('roll") de *120* graus

(alcançada apenas na configuração inicial em que φ_1 e φ_2 são iguais a zero) para *180* ou até mesmo *360* graus, se forem substituídos os servomotores empregados por outros que não apresentem esta restrição de deslocamento angular máximo.



(a) (b)

Fig. 5.1 – Ângulo de rolamento: (a) *3 RRR* e (b) *3 RRR+RUR*.

Quanto aos outros ângulos, observou-se que os intervalos de variação, tanto do ângulo de arfagem ('pitch") como de guinada ("yaw"), são de aproximadamente *120* graus. Estes valores, apesar de serem inferiores aos demonstrados por punhos seriais, sofreram influência das próprias limitações do protótipo construído. Assim, mediante a implementação de algumas modificações, torna-se viável aumentar estes intervalos para valores próximos de *180* graus. Tais modificações contemplam a substituição das dobradiças utilizadas por juntas de rotação que não apresentem limitação de deslocamento angular, além de se alterar a posição relativa das peças móveis de modo a que não haja qualquer possibilidade de interferência entre elas.

Algumas vantagens da arquitetura escolhida incluem movimento esférico, não ocorrência de configurações singulares, e rápida resposta dinâmica tendo em vista a instalação dos atuadores na base.

O punho desenvolvido tem um potencial enorme para resultar em desenvolvimentos futuros altamente relevantes. Um deles encontra aplicações na biomecânica, onde se prevê que o protótipo construído sirva como base para a síntese de uma prótese de punho humano. Devido à sua inerente rigidez e às pequenas folgas ("backlash") demonstradas pelo punho robótico, uma aplicação viável será o seu emprego como dispositivo háptico, ou seja, um dispositivo de interface para interação com ambientes reais e virtuais, resultando numa ferramenta importante para um médico realizar cirurgias à distância. Ainda dentro do campo da medicina, a arquitetura escolhida poderá sofrer uma diminuição significativa em seu tamanho pela utilização de juntas flexíveis ao invés de juntas convencionais de revolução, e o mesmo passará a ser "compliant". Um punho robótico de pequeno tamanho poderá ser empregado como um avançado instrumento cirúrgico endoscópico para cirurgias minimamente invasivas.

6 Conclusões

Este trabalho apresentou um procedimento qualitativo para realizar a síntese topológica de uma estrutura cinemática paralela tendo em vista a função de punho robótico. Este procedimento constitui-se numa iniciativa inovadora para comparação entre arquiteturas paralelas normalmente enumeradas pela aplicação de diferentes métodos de geração de topologias.

Os critérios adotados para comparação consideram a complexidade estrutural, a faixa de deslocamento das juntas presentes, a localização dos atuadores, redundância e a capacidade da arquitetura de executar movimentos esféricos.

O método de síntese topológica apresentado recomendou a estrutura cinemática paralela *3* $\underline{R}RR + \underline{R}UR$ como uma das mais adequadas para a aplicação de punho robótico. Mediante o desenvolvimento da análise cinemática, foi possível avaliar o seu desempenho quanto ao espaço de trabalho disponível e à eventual presença de configurações singulares neste mesmo espaço.

Quanto ao espaço de trabalho, os intervalos de variação do seus ângulos de orientação são superiores aos de outros punhos paralelos esféricos, e inferiores aos apresentados por punhos seriais. Mediante a implementação de pequenas modificações no protótipo construído, torna-se viável atingir um desempenho comparável ao alcançado por outros punhos seriais comerciais quanto a este quesito.

Dentre as vantagens da arquitetura escolhida incluem movimento esférico, não ocorrência de configurações singulares, e rápida resposta dinâmica tendo em vista a instalação dos atuadores na base.

O punho desenvolvido tem um potencial enorme para resultar em desenvolvimentos futuros altamente relevantes. Os trabalhos futuros se concentrarão em estender o procedimento de síntese topológica proposto a outras aplicações que possam requerer estruturas cinemáticas paralelas. Pela redução do tamanho do protótipo, prevê-se possíveis aplicações envolvendo o desenvolvimento de próteses e dispositivos cirúrgicos.

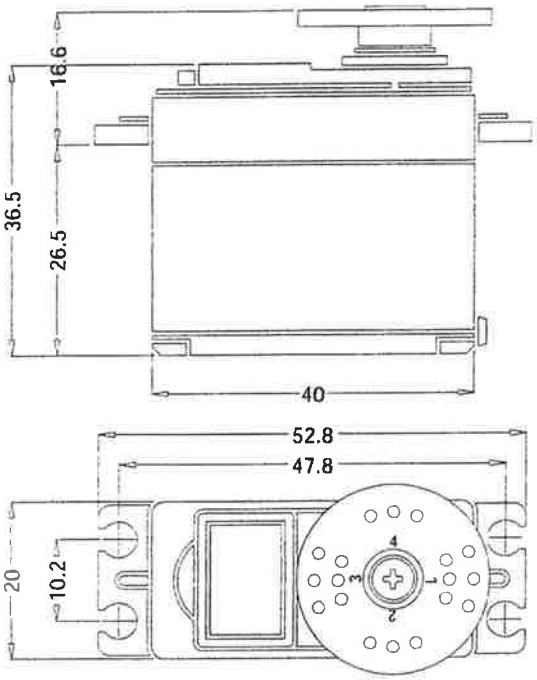
Anexo A

Subsistema de controle

ANNOUNCED SPECIFICATION OF HS-322 STANDARD DELUXE SERVO

1.TECHNICAL VALUES

CONTROL SYSTEM	:+PULSE WIDTH CONTROL 1500usec NEUTRAL	
OPERATING VOLTAGE RANGE	:4.8V TO 6.0V	
OPERATING TEMPERATURE RANGE	:-20 TO +60° C	
TEST VOLTAGE	:AT 4.8V	:AT 6.0V
OPERATING SPEED	:0.19sec/60° AT NO LOAD	:0.15sec/60° AT NO LOAD
STALL TORQUE	:3kg.cm(41.66oz.in)	:3.5kg.cm(48.60oz.in)
STANDING TORQUE	:3kg.cm(41.66oz.in)	:3.5kg.cm(48.60oz.in)
OPERATING ANGLE	:40°/ONE SIDE PULSE TRAVELING 400usec	
DIRECTION	:CLOCK WISE/PULSE TRAVELING 1500 TO 1900usec	
IDLE CURRENT	:7.4mA	:7.7mA
RUNNING CURRENT	:160mA	:180mA
DEAD BAND WIDTH	:5usec	
CONNECTOR WIRE LENGTH	:300mm(11.81in)	
DIMENSIONS	:40x20x36.5mm(1.57x0.78x1.43in)	
WEIGHT	:43g(1.51oz)	



2.FEATURES

3-POLE FERRITE MOTOR
LONG LIFE POTENTIOMETER
DIRECT POTENTIOMETER DRIVE
MOTOR DIRECTLY ATTACHED TO CIRCUIT
ONE RESIN BUSHING

3.APPLICATIONS

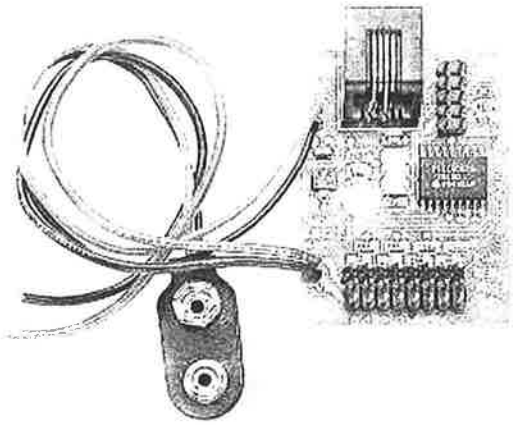
AIRCRAFT 20-40 SIZE
STEERING AND THROTTLE SERVO FOR CARS
TRUCKS AND BOATS

MiniSSC II (serial servo controller) (#27912) Specifications

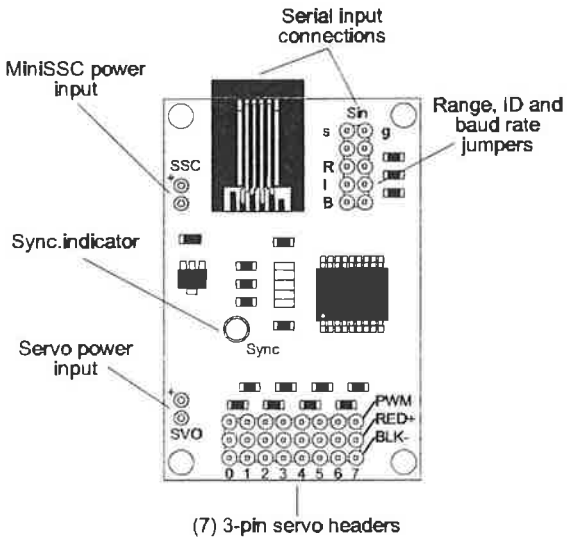
The MiniSSC II from Scott Edwards Electronics is a servo motor controller with a simple serial interface. Each MiniSSC can control up to 8 servos and multiple MiniSSCs can be daisy-chained to control up to 255 servos at once*. Simple SEROUT commands can be used in the BASIC Stamp to communicate with the module at 2400 and 9600 baud.

Features of the MiniSSC II:

- Simple serial interface (2400 or 9600 baud);
- Controls up to 8 servos at once;
- switchable range/resolution (90°/0.36° or 180°/0.72°);
- ID jumper for daisy-chaining an additional MiniSSC;
- standard 3-pin headers for servo connection.



MiniSSC II



Basic Specifications

Power requirements (MiniSSC)	7 to 15 VDC @ 10 mA
Power requirements (Servo)	4.8 to 6.0 VDC (current varies)
Serial input	RS-232, or inverted TTL/CMOS, 9600 or 2400, N81 via header posts or phone jack
Operating temperature	0° to 50°C (32° to 122°F)
Servo output connector	3-pin header (0.1" spacing) PWM, Power, Ground.
Pulse frequency	60 Hz
Pulse width range	1.0 to 2.0ms (normal), 0.5 to 2.5ms (max)
Pulse width at startup (centered)	1.5ms
Pulse width resolution	4us (normal), 8us (max)

The MiniSSC II package includes:

- MiniSSC II module;
- printed documentation with sample BS1 and BS2 programs;

Sample BASIC Stamp Code:
The following code examples move servo 0 to position 100.

BASIC Stamp I Code:

```
'No jumper on I or B
SEROUT 0,N2400,(255,0,100)
```

BASIC Stamp II Code:

```
'No jumper on I
SEROUT 0,$4054,[255,0,100]
```

BASIC Stamp is a registered trademark of Parallax, Inc.
**Two standard MiniSSC IIs can be connected for control of up to 16 servos. Special MiniSSC IIs must be ordered directly from Scott Edwards Electronics to control 17 to 255 servos.*

The Mini SSC Panel v1.2 software is a Windows based computer program that allows you to explore the exciting world of animatronics (a combination of animation and electronics) with ease. With this program, you can control the movements of standard hobby servos attached to just about any creation you can imagine. Create robot figures that move on your command or puppets that seem to come alive. The possibilities are endless.

What is the Mini SSC Panel?

The Mini SSC Panel is a graphical user interface allowing you to easily control standard hobby servos attached to a serial servo controller (SSC) circuit board. This interface provides setup, movement control and movement recording/playback features.

What's new in the Freelance Edition?

Since the release of the Mini SSC Panel v1.1 in early 1997 we have had numerous requests for improvements to the software. We have answered most of these requests with the release of the Freelance Edition.

New features include:

"Sleep" Mode
Playback Looping
Editable recordings
"Script Manager"
Servo Labeling
Recording and Playback step readout
Smoother Playback
Enhanced user guide and help system

System Requirements:

486 or higher processor (Pentium recommended)
8 Megabytes of RAM (32 recommended)
3.5" 1.44MB floppy
Windows 3.x, 95, 98 or NT
Available serial port
20 Megabytes of hard drive space

Using the Software:

The Control Panel *(view image)*

The Control Panel is the first screen to contain servo motion controls. You use common Windows scroll bars to control the servos attached to your SSC(s). The Control Panel is an excellent tool to calibrate your animatronic creation.

Use the Control Panel to:

Test SSC/servo connections and functionality
Test the minimum bounds of your servos
Test the maximum bounds of your servos
Determine the "Home" position of your servos
Experiment with different speeds
Devise recording strategies and positioning techniques

The Recorder (view image)

We have developed a flexible and easy-to-use interface to record your animatronic projects. With the Mini SSC Panel v1.2 Freelance Edition you can combine small sub-recordings into larger more robust animatronic productions using our "Script Manager." By creating smaller recordings and compiling them into larger "Scripts" you can focus on each detail of your animation. For instance, once you have the gripper on your robotic arm working exactly the way you want, you can use that piece over and over again in your final script to keep your movements consistent.

Script Manager (view image)

One of the most exciting features of the Mini SSC Panel v1.2 Freelance Edition is the Script Manager. The Script Manager allows you to group smaller sub-recordings into larger, more robust animation productions.

Copyright 1999 Mister Computer. All Rights Reserved.

Lista de Referências

ABB. **Robotics-Parallel robots IRB940.** Disponível em: <http://www.abb.com> Acesso em 18 nov. 2004.

ANANTHASURESH, G.K.; KOTA, S. Type Synthesis and Creative Design: Historical review. In: ERDMAN, A.G. (ed.). **Modern Kinematics: developments in the last forty years.** New York: John Wiley & Sons, 1993. p. 30-36.

ANGELES, J. The qualitative synthesis of parallel manipulators. Journal of Mechanical Design. Transactions of the ASME, v.126, n.4, p.617-624, 2004.

BHATTACHARYA, S.; HATWAL, H.; GOSH, A. Comparison of an exact and an approximate method of singularity avoidance in platform type parallel manipulators. Mechanism and Machine Theory, v. 33, n. 7, p.965-974, 1998.

BONEV, I. **ParalleMIC – the Parallel Mechanisms Information Center**. Disponível em: <http://www.parallemic.org/Terminology/General.html> . Acesso em: 10 dez. 2001.

BONEV, I.; RYU, J. A new approach to orientation workspace analysis of 6-DOF parallel manipulators. Mechanism and Machine Theory, v. 36, p.15-28, 2001a.

BONEV, I.; RYU, J. A geometrical method for computing the constant-orientation workspace of 6-PRRS parallel manipulators. Mechanism and Machine Theory, v. 36, p.1-13, 2001b.

BROGÅRDH, T. PKM Research - Important Issues, as seen from a Product Development Perspective at ABB Robotics. In: WORKSHOP ON "FUNDAMENTAL ISSUES AND FUTURE RESEARCH DIRECTIONS FOR PARALLEL MECHANISMS AND MANIPULATORS". October 3–4, 2002. Quebec City, Quebec, Canada, **Proceedings.** 2002, p.68-82.

CRAIG, J. J. **Introduction to robotics: mechanics and control**. Reading, Mass.: Addison-Wesley, 2nd edition, 1989, 450p.

DASGUPTA, B. ; MRUTHYUNJAYA, T. S. The Stewart platform manipulator: a review. Mechanism and Machine Theory, v.35, p.15-40, 2000.

DI GREGORIO, R. A new parallel wrist using only revolute pairs: the 3-RUU wrist. Robotica, v.19, p.305-309, 2001.

DI GREGORIO, R. The 3-RRS wrist: a new, simple and non-overconstrained spherical parallel manipulator. Journal of Mechanical Design. Transactions of the ASME, v.126, n.5, p.850-855, 2004.

DI GREGORIO, R.; PARENTI-CASTELLI, V. Position analysis in analytical form of the 3-PSP mechanism. Journal of Mechanical Design. Transactions of the ASME, v. 123, p.51-57, 2001.

DI GREGORIO; PARENTI-CASTELLI, V. Design of 3-dof parallel manipulators based on dynamic performances. In: CHEMNITZ PARALLEL KINEMATICS SEMINAR, 4., PKS2004, Prof. Dr. Reimund Neugebauer (ed.), Verlag Wissenschaftliche Scripten, **Proceedings.** Reports from IWU, v. 24, 2004, p.385-397.

FANG, Y.; TSAI, L.-W. Structure Synthesis of a Class of 4-DoF and 5-DoF Parallel Manipulators with Identical Limb Structures. The International Journal of Robotics Research, p.799-810, 2002.

GIECK, K. **Manual de fórmulas técnicas**. 4a. edição. São Paulo: Hemus, 1996.

GOSSELIN, C. M.; PERREAULT, L.; VAILLANCOURT, C. Simulation and computer-aided kinematic design of three-degree-of-freedom spherical parallel manipulators. Journal of Robotic Systems , v.12, n.12, p.857-869, 1995.

GOSSELIN, C.M, Laboratorie de robotique, Université Laval. Disponível em : <http://wwwrobot.gmc.ulaval.ca/recherche/theme01_a.html>. Acesso em 15 set. 2004.

GOSSELIN, C.M, ST-PIERRE, E.; GAGNÉ, M. On the development of the agile eye: mechanical design, control issues and experimentation. IEEE Robotics and Automation Society Magazine, v. 3, n. 4, p. 29-37, 1996.

GOSSELIN, C.M.; KONG, X.; FOUCAULT, S.; BONEV, I.A. A fully-decoupled 3-dof translational parallel mechanism. In: CHEMNITZ PARALLEL KINEMATICS SEMINAR, 4., R. Neugebauer (ed.), Chemnitz, Germany, April 20-21, **Proceedings**. IWU vol. 24, 2004, p. 595-610.

HERVE, J. M. Analyse structurelle des mécanismes par groupe des déplacements. Mechanism and Machine Theory, v.13, p. 437-450, 1978.

HESS-COELHO, T. A. Topologia, análise e síntese de mecanismos tridimensionais paralelos. Relatório Final. Proc.No. 0471/01-1 . CAPES, 2002, 27p.

HESS-COELHO, T. A. Topological synthesis of a parallel wrist mechanism. In: 28th Biennial Mechanisms and Robotics Conference, 2004, Salt Lake City, EUA. International Design Engineering Technical Conferences. New York: American Society of Mechanical Engineers, **Proceedings.** 2004a.

HESS-COELHO, T. A. Prototype of a redundant parallel robot wrist. In: 28th Biennial Mechanisms and robotics conference, 2004, Salt Lake City, EUA. International Design Engineering Technical conferences. New York: American Society of Mechanical Engineers, **Proceedings.** 2004b.

HESS-COELHO, T.A.H. Topological synthesis of a parallel wrist mechanism. Journal of Mechanical Design, Transactions of the ASME, ISSN 1050-0472, manuscript # MD-04-1195, v.128, n.1, 2006 (in press).

HUNT, K. H. Structural kinematics of in-parallel-actuated robot arms. Journal of Mechanisms, Transmission and Automation in Design. Transactions of the ASME, v. 105, p.705-712, 1983.

HUYNH, P.; HERVÉ, J.M. Equivalent kinematic chains of three-degree-of-freedom tripod mechanisms with planar-spherical bonds. Journal of Mechanical Design. Transactions of the ASME, v.127,n.1, p.95-102, 2005.

JIN, Q. ; YANG, T-L. Theory for topology synthesis of parallel manipulators and its application to three-dimension-translation parallel manipulators. Journal of Mechanical Design. Transactions of the ASME, v.126, n.4, p.625-639, 2004.

KAROUIA, M.; HERVÉ, J.M. A three-dof tripod for generating spherical rotation. In: LENARCIC, J.; STANISIC, M.M. (eds). **Advances in Robot Kinematics.** Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2000. p.395-402.

KAROUIA, M.; HERVÉ, J.M. An orientational 3-dof parallel mechanism. In: CHEMNITZ PARALLEL KINEMATICS SEMINAR, 3., R. Neugebauer (ed.), Chemnitz, Germany, April 23-25, 2002. **Proceedings**. IWU, v. 16, 2002a. p. 139-150.

KAROUIA, M.; HERVÉ, J.M. A family of novel orientational 3-dof parallel robots. In: RomanSy'2002, Udine, Italy, July 1-4, **Proceedings.** p. 359-368, 2002b.

KAROUIA, M. ; HERVÉ, J. M. The novel 3-RUU Wrist with no idle pair. In: WORKSHOP ON FUNDAMENTAL ISSUES AND FUTURE RESEARCH DIRECTIONS FOR PARALLEL MECHANISMS AND MANIPULATORS, Quebec, Canada, October 3–4, **Proceedings.** 2002c, p. 284-286.

KIM, H.S. ; TSAI, L.-W. Design Optimization of a Cartesian Parallel Manipulator. In: 2002 ASME DETC, 29-1 Sep. 2002, Montreal, Canada. **Proceedings.** 2002.

KIM, J., PARK, F.C. ; LEE, J.M. A new parallel mechanism machine tool capable of five-face machining In: *Annals of CIRP*, 1999, 5p.

KONG, X.; GOSSELIN, C. M. Type synthesis of 3-DoF spherical parallel manipulators based on screw theory. Journal of Mechanical Design. Transactions of the ASME, v.126, n.1, p.101-108, 2004a.

KONG, X.; GOSSELIN, C. M. Type synthesis of Three-degree-of-freedom spherical parallel manipulators. The International Journal of Robotics Research, v.23, n.3, p.237-245, 2004b.

KURTZ, R.; HAYWARD, V. Multiple-goal kinematic optimization of a parallel spherical mechanism with actuator redundancy. IEEE Transactions on Robotics and Automation, v.8, n.5, p.644-651, 1992.

LEGUAY-DURAND, S.; REBOULET, C. Optimal design of a redundant spherical parallel manipulator. Robotica, v.15, p.399-405, 1997.

MARTÍNEZ, J.M.R.; RAVANI, B. On mobility analysis of linkages using group theory. Journal of Mechanical Design. Transactions of the ASME, v.125, n.1, p.70-80, 2003.

MERLET, J.P. **Parallel Robots: Open Problems.** Disponível em: <http://www-sop.inria.fr/coprin/equipe/merlet/Problemes/ isrr99- html.html> Acesso em 16 jun. 2000.

MERLET, J. P. **Parallel robots.** Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2000, 355p.

MERLET, J. P. **Still a long way on the road for parallel mechanisms**. A key note speech to be presented at ASME DETC 2002 Conference, Montréal. Disponível em: <http://www-sop.inria.fr/coprin/ equipe/merlet/ASME/asme2002.html>, Acesso em 15 dez. 2002a.

MERLET, J.P. An initiative for the kinematics study of parallel manipulators. WORKSHOP ON FUNDAMENTAL ISSUES AND FUTURE RESEARCH DIRECTIONS FOR PARALLEL MECHANISMS AND MANIPULATORS, Quebec, Canada, October 3–4, **Proceedings.** p.2-9, 2002b.

MERLET, J. P. ALIAS-C++: A C++ Algorithms Library of Interval Analysis for equation Systems, version 2.2, INRIA, Sophia Antipolis, 2003.

MORGAN, A.P. A method for computing all solutions to systems of polynomials equations", ACM Transactions on Mathematical software, v.9, n.1, p.1-7, 1983.

OLSON, D.G.; ERDMAN, A.G.; RILEY, D.R. A systematic procedure for type synthesis of mechanisms with literature review. Mechanism and Machine Theory, v.20, n.4, p.285-295, 1985.

PARENTI-CASTELLI, V. ; DI GREGORIO, R. Real-time computation of the actual posture of the general geometry 6-6 fully-parallel mechanism using two extra rotary sensor. ASME Journal of Mechanical Design, v. 120, p.549-554, 1998.

PARENTI-CASTELLI, V. ; DI GREGORIO, R. Determination of the actual configuration of the general Stewart platform using only one additional sensor. ASME Journal of Mechanical Design, v. 121, p.21-25 1999.

PIERROT, F. ; COMPANY, O. H4: a new family of 4-dof parallel robots. LIRMM – UMR 5506 CNRS / U.M. 2 Montpellier, France, 1998.

PRESS, W. H.; TEUKOLSKY, S. A.; VETTERLING, W. T.; FLANNERY, B. P., **Numerical recipes in FORTRAN** – The art of scientific computing. 2nd edition, Cambridge: Cambridge University Press, 1994, 963p.

RAGHAVAN M.; ROTH, B. A general solution for the inverse kinematics of all series chains. CISM-IFToMM SYMPOSIUM ON ROBOTS AND MANIPULATORS (ROMANSY-90), 8., Cracow, Poland, **Proceedings.**1990.

RASZL, G. Avaliação do potencial de utilização de um mecanismo paralelo como máquina ferramenta. Dissertação de Mestrado apresentada à Universidade de São Paulo, 2003, 92p.

ROSHEIM, M. E. **Robot wrist actuators**. New York: John Wiley & Sons, 1989.

SCHNYDER, M. et al. Spherical joints with 3 and 4 degrees of freedom for 5-axis Parallel Kinematic Machine tool. CHEMNITZ PARALLEL KINEMATICS SEMINAR, 4., R. Neugebauer (ed.), Chemnitz, Germany, April 20-21, **Proceedings.** IWU vol. 24, 2004, p.487-502.

SHOHAM, M.; ROTH, B. Connectivity in open and closed loop robotic mechanisms. Mechanism and Machine Theory. v.32, n.3, p.279-293, 1997.

SOUZA, C.H.J. Análise da posição e orientação da plataforma de Stewart tipo 3-3 em função dos erros nos atuadores. Dissertação de Mestrado apresentada à Universidade Federal de Uberlândia, 1997, 120p.

SUH, C. H.; RADCLIFFE, C. W. **Kinematics and Mechanism Design**. New York: John Wiley & Sons, 1978, 434p.

TAKEDA, Y., FUNABASHI, H.; SASAKI, Y. Development of a spherical in-parallel actuated mechanism with three degrees of freedom with large working space and high motion transmissibility. JSME International Journal, Series C, v.39, n.3, pp 541-548, 1996.

TESAR, D.; BUTLER, M. S. A generalized modular architecture for robot structures. Manufacturing review, v.2, n.2, p.91-117, 1989.

TSAI, L.-W. **Robot analysis: the mechanics of serial and parallel manipulators**. New York: John Wiley & Sons, 1999, 505p.

VALASEK, M.; SIKA, Z., BAUMA, V. ; VAMPOLA, T. The innovative potential of redundantly actuated PKM. CHEMNITZ PARALLEL KINEMATICS SEMINAR, 4., PKS2004, Prof. Dr. Reimund Neugebauer (ed.), Verlag Wissenschaftliche Scripten, Reports from IWU, v. 24, **Proceedings.** 2004, p.365-383.

WANG, J.; GOSSELIN, C.M. Kinematic analysis and design of kinematically redundant parallel mechanisms. Journal of Mechanical Design. Transactions of the ASME, v.126, n.1, p.109-118, 2004.

WIITALA, J. M.; STANISIC, M.M. Design of an overconstrained and dextrous spherical wrist. Journal of Mechanical Design. Transactions of the ASME, v.122, n.3, p.347-353, 2000.

ZHANG, D.; GOSSELIN, C. L. Kinetostatic modeling of n-dof parallel mechanisms with a passive constraining leg and prismatic actuators. Journal of Mechanical Design. Transactions of the ASME, v. 123, p.375-381, 2001.