UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA POLITÉCNICA

FERNANDO MALVEZZI

**Avaliação do comportamento cinemático de um mecanismo
paralelo tridimensional**

São Paulo

2006

FERNANDO MALVEZZI

**Avaliação do comportamento cinemático de um mecanismo
paralelo tridimensional**

**Dissertação apresentada à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para obtenção do Título de
Mestre em Engenharia**

Área de Concentração: Engenharia Mecânica

Orientador: Prof. Dr. Tarcisio Antonio Hess Coelho

São Paulo

2006

FOLHA DE APROVAÇÃO

FERNANDO MALVEZZI

Avaliação do comportamento cinemático de um mecanismo paralelo tridimensional

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para obtenção do Título de
Mestre em Engenharia
Área de Concentração: Engenharia Mecânica
Orientadora: Prof. Dr. Tarcisio Antonio Hess Coelho

Aprovado em: ____ / ____ / ____ .

Banca Examinadora

Prof. Dr. _____

Instituição _____ Assinatura _____

Prof. Dr. _____

Instituição _____ Assinatura _____

Prof. Dr. _____

Instituição _____ Assinatura _____

Prof. Dr. _____

Instituição _____ Assinatura _____

Prof. Dr. _____

Instituição _____ Assinatura _____

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador Professor Dr. Tarcisio Antonio Hess Coelho, por sua paciência, ensinamentos e dedicação.

Aos meus pais, pela educação que me propiciaram adquirir.

Aos professores José Roberto Augusto de Campos, Konstantinos D. Stravopoulos e Renato Romio do Instituto Mauá de Tecnologia, pela oportunidade de ingresso na área acadêmica.

Ao amigo Luciano de Souza pela presença marcante.

RESUMO

MALVEZZI, F. **Avaliação do comportamento cinemático de um mecanismo paralelo tridimensional**. 2006. 135f. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

Este trabalho propõe uma nova estrutura cinemática paralela tridimensional com três graus de mobilidade que pode ser aplicada como robô manipulador. O volume do espaço de trabalho disponível é empregado como índice para avaliar o desempenho cinemático do mecanismo.

As cinemáticas de posição e velocidade são desenvolvidas, tendo em vista o levantamento das configurações singulares e do espaço de trabalho. Os resultados obtidos com as cinemáticas direta e inversa são comparados de modo a verificar a correspondência entre eles.

São levantadas diversas configurações singulares que correspondem ao alinhamento entre as barras das cadeias ativas do mecanismo e uma família de singularidades para uma das cadeias ativas é apresentada.

O volume do espaço de trabalho do mecanismo é calculado pelo método da discretização, de modo a avaliar o volume do espaço de trabalho disponível, bem como a identificação da influência dos parâmetros dimensionais do mecanismo sobre este volume. O volume do espaço de trabalho com os parâmetros ótimos é expressivo, quando comparado com aqueles alcançados por manipuladores robóticos convencionais.

Palavras-chave: mecanismo paralelo, cinemática, configurações singulares, espaço de trabalho.

ABSTRACT

MALVEZZI, F. Evaluation of kinematic performance of a tridimensional parallel mechanism. 2006. 135p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

This dissertation proposes a novel three-degree-of-freedom parallel kinematic structure in order to be applied as a three-dimensional robot manipulator. The volume of the available workspace is employed as a performance index to evaluate the kinematic behavior of the mechanism.

The position and velocity kinematics are developed for mapping singular configurations and evaluating the workspace. The results obtained by performing the direct and inverse kinematics are compared in order to verify the consistency between them. It is demonstrated that most of singular configurations is represented by the alignment of the links that belong to each active chain. In addition, a family of singularities for one of the active chains is presented.

The volume of the workspace is calculated by using the discretization method not only for evaluating the feasible workspace but also for identifying the influence of dimensional parameters with respect to this volume. The achieved workspace by employing the optimal parameters is comparable to that reached by conventional robot manipulators.

Keywords: parallel mechanism, kinematics, singular configurations, workspace.

LISTA DE FIGURAS

2.1- (a) Robô DELTA aplicado como manipulador (ABB, 2006); (b) Robô DELTA aplicado na medicina (DELTA, 2006)	16
2.2 - Cadeias cinemáticas: (a) aberta; (b) fechada	17
2.3– Diagramas cinemáticos: (a) mecanismo paralelo; (b) mecanismo serial (CRAIG, 1999)	18
2.4- Diagrama cinemático de um mecanismo paralelo híbrido	19
2.5– Mecanismo H4: (a) com atuadores lineares (PIERROT, 2001); (b) com atuadores giratórios (PIERROT, 2001)	20
2.6- Mecanismo Tetraglide: (a) Modelo em CAD; (b) seu diagrama cinemático (RASZL, 2003)	22
2.7 - Notação gráfica das cadeias cinemáticas do mecanismo Tetraglide (RASZL, 2003)	23
2.8 – Mecanismo 3-PSP (DI GREGORIO, PARENTI-CASTELLI, 1980)	24
2.9 – Mecanismo 6 $\underline{P}$ US (BONEV; RYU, 2001)	26
2.10 – Estrutura cinemática e os sistemas de referência global (QXYZ) e local (Oxyz)	26
2.11 – Configuração singular da cinemática inversa para o mecanismo 3 $\underline{R}$ RRRR (HESS-COELHO, 2005a)	31
2.12 – Configuração singular da cinemática direta para o mecanismo 3 $\underline{R}$ RRRR (HESS-COELHO, 2005a)	32
3.1- robô SCARA (2006)	35
3.2- Espaço de trabalho do robô SCARA (cor cinza)	36
3.3- Cadeia passiva do mecanismo 3 $\underline{R}$ SS + CP	37
3.4- Diagramas Cinemáticos: (a) 3 UPS+CP; (b) 3 PUS+CP; (c) 3 $\underline{R}$ US+CP (HESS-COELHO et al., 2005)	37
3.5- (a) Modelo gerado em CAD (HESS-COELHO et al., 2005); (b) Diagrama cinemático	38
3.6 – Notação na forma de grafos para o mecanismo 3 $\underline{R}$ SS+CP	39
4.1 - Desenho cinemático do mecanismo	41
4.2 – Vista do órgão terminal no plano xy	41
4.3 – Vista no plano XY (quando o ponto O está sobre o eixo QZ)	42
4.4 – (a) cadeia ativa 1; (b) cadeia passiva	46
4.5 – cadeia ativa 2	47
4.6 – cadeia ativa 3	48
4.7 – Exemplo de aplicação para primeira configuração de mecanismo	54
4.8 - Exemplo de aplicação para segunda configuração de mecanismo	55

4.9 – Exemplo de aplicação para primeira configuração de mecanismo	56
4.10 - Exemplo de aplicação para segunda configuração de mecanismo	57
4.11 – Exemplo de aplicação para primeira configuração de mecanismo	58
4.12 - Exemplo de aplicação para segunda configuração de mecanismo	59
4.13 - Comparação entre resultados das cinemáticas direta e inversa para uma trajetória	61
4.14 – Singularidade - alinhamento das barras da cadeia 1	67
4.15 – Singularidade - alinhamento das barras da cadeia 2	70
4.16 – Singularidade - alinhamento das barras da cadeia 3	73
4.17 – limite da cota z_o em função do curso do par prismático	80
4.18- Junta esférica: (a) foto do fabricante THK (2005); (b) amplitude entre as barras	80
4.19- Identificação do ângulo γ_i	82
4.20- Identificação do ângulo ξ_i	83
4.21- Espaço de trabalho para a cota z_o variando entre 0 e 50 mm	84
4.22- Espaço de trabalho para a cota z_o variando entre 60 e 110 mm	85
4.23- Espaço de trabalho para a cota z_o variando entre 120 e 170 mm	86
4.24- Espaço de trabalho para a cota z_o variando entre 180 e 205 mm	87
4.25- Espaço de trabalho para a cota z_o variando entre 210 e 235 mm	88
4.26- Espaço de trabalho para a cota z_o variando entre 240 e 265 mm	89
4.27- (a) passo para as variáveis x_o e y_o (b) dimensões do paralelepípedo	90
4.28– Influência da amplitude das juntas no volume de espaço de trabalho	92
4.29– vista da cadeia 2 quando z_o é máximo	93
4.30- Volume do espaço de trabalho em função de K_{barra} e $K_{triângulos}$	98
4.31- Volume do espaço de trabalho em função de K_{barra} e $K_{triângulos}$	101
5.1- Diagrama cinemático do mecanismo: (a) ponto C na periferia; (b) ponto C no interior	104
5.2- Segunda cadeia no plano YZ	105
5.3- Família de singularidades para a cadeia 2	106
5.4- Segunda cadeia no plano YZ	106
5.5- (a) passo para as variáveis x_o e y_o (b) volume discreto para uma coordenada x_o e y_o	109
5.6- Vista do volume do espaço de trabalho no plano YZ	110

LISTA DE TABELAS

2.1 - Tipos de juntas (SUH; RADCLIFFE, 1978; TSAI, 2000)	21
4.1 - Parâmetros do mecanismo para os exemplos de aplicação	53
4.2 – Exemplo de aplicação de aplicação para primeira configuração do mecanismo	54
4.3 – Exemplo de aplicação de aplicação para segunda configuração do mecanismo	55
4.4 – Exemplo de aplicação de aplicação para primeira configuração do mecanismo	56
4.5 – Exemplo de aplicação de aplicação para segunda configuração do mecanismo	57
4.6 – Exemplo de aplicação de aplicação para primeira configuração do mecanismo	58
4.7 – Exemplo de aplicação de aplicação para segunda configuração do mecanismo	59
4.8 – Comparação entre resultados obtidos com as cinemáticas direta e inversa para uma trajetória	60
4.9 – Parâmetros do mecanismo para levantamento de configurações singulares	65
4.10 – Parâmetros do mecanismo para determinação do espaço de trabalho	79
4.11 – Influência do passo adotado sobre o valor estimado do espaço de trabalho	92
4.12 – Parâmetros do mecanismo para otimizar o espaço de trabalho	95
4.13 – Volume do espaço de trabalho em função das dimensões do mecanismo	96
4.14 – Volume do espaço de trabalho em função das dimensões do mecanismo	99
5.1 – Comparação entre o volume do espaço de trabalho antes e após a otimização	108

LISTA DE SÍMBOLOS

C	junta cilíndrica
C_k	conectividade da cadeia ativa k
C_T	conectividade total do mecanismo
$c\alpha, c\phi, c\theta_i$	cosseno dos ângulos α, ϕ, θ_i , respectivamente
ε	precisão atribuída para o anulamento do determinante de J_x
ξ_i	ângulo entre o eixo da junta esférica i e a correspondente barra superior i (para as juntas esféricas do órgão terminal)
ϕ	ângulo de orientação da plataforma móvel
γ_i	ângulo entre o eixo da junta esférica i e a correspondente barra superior i (para as juntas esféricas que conectam as barras entre si)
$G.M.$	graus de mobilidade ou liberdade
J_x, J_q	matrizes jacobianas
J'_x, J'_q	cofatores das matrizes jacobianas
K_{barra}	razão entre os comprimentos das barras superiores e inferiores das cadeias cinemáticas
$K_{triângulos}$	razão entre as dimensões dos triângulos
L_i	comprimento da barra superior da cadeia i
l_i	comprimento da barra inferior i
l_s	comprimento da barra superior i
m	número de cadeias ativas
n	número de peças do mecanismo
nj_i	número de juntas com grau de liberdade i
P	junta prismática
$QXYZ$	referencial fixo ou sistema global
$\vec{q}$	vetor dos deslocamentos dos atuadores
$\dot{\vec{q}}$	vetor das velocidades dos atuadores
R	junta de rotação
S	junta esférica
$s\alpha, s\phi, s\theta_i$	seno dos ângulos α, ϕ, θ_i , respectivamente
U	junta universal
$\vec{x}$	vetor que define a localização do órgão terminal
$\dot{\vec{x}}$	vetor das velocidades do órgão terminal

x_o, y_o, z_o	coordenadas globais que definem a posição da origem do órgão terminal
λ	dimensão do espaço de trabalho do mecanismo
$\theta_1, \theta_2, \theta_3$	deslocamento angular dos motores 1,2 e 3, respectivamente

SUMÁRIO

1	Introdução	12
1.1	Considerações preliminares	12
1.2	Objetivos	13
1.3	Sobre a divisão do trabalho	13
2	Revisão Bibliográfica	15
2.1	Mecanismos Paralelos: considerações iniciais	15
2.2	Síntese topológica	23
2.3	Cinemática	26
2.4	Singularidades	30
2.5	Espaço de trabalho	32
2.6	Comentários sobre a revisão bibliográfica	33
3	Análise topológica do mecanismo	35
3.1	Geração da topologia	35
3.2	Graus de mobilidade	37
4	Análise cinemática do mecanismo e espaço de trabalho	39
4.1	Análise cinemática do mecanismo	39
4.1.1	Cinemática inversa	41
4.1.1.1	Determinação de deslocamento angular θ_1	43
4.1.1.2	Determinação de deslocamento angular θ_2	45
4.1.1.3	Determinação de deslocamento angular θ_3	46
4.1.2	Cinemática Direta	47
4.1.3	Exemplo de aplicação das cinemáticas inversa e direta	52
4.2	Singularidades	60
4.2.1	Singularidades da cinemática inversa	65
4.2.2	Singularidades da cinemática direta	74
4.3	Espaço de trabalho	77
4.3.1	Considerações preliminares	77
4.3.2	Restrições físicas e cinemáticas	77
4.3.3	Algoritmos para avaliação de espaço de trabalho	80
4.4	Otimização do espaço de trabalho	92
5	Discussão	101
6	Conclusões	111
	Referências	113
	Anexo	116