

GERD ERWIN ERNST GOJTAN

ANÁLISE DA PRECISÃO DE UMA ESTRUTURA ROBÓTICA COM
CINEMÁTICA PARALELA ASSIMÉTRICA DE TOPOLOGIA 2UPS+PRP,
EM FUNÇÃO DO MAPEAMENTO DOS ERROS DE POSICIONAMENTO
DA PLATAFORMA MÓVEL NO ESPAÇO DE TRABALHO DISPONÍVEL,
DURANTE OPERAÇÃO DE FRESAMENTO DE ACABAMENTO,
APLICANDO MODELAGEM MATEMÁTICA

Tese apresentada à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para a obtenção
do título de Doutor em Engenharia.

São Paulo

2009

GERD ERWIN ERNST GOJTAN

ANÁLISE DA PRECISÃO DE UMA ESTRUTURA ROBÓTICA COM
CINEMÁTICA PARALELA ASSIMÉTRICA DE TOPOLOGIA 2UPS+PRP,
EM FUNÇÃO DO MAPEAMENTO DOS ERROS DE POSICIONAMENTO
DA PLATAFORMA MÓVEL NO ESPAÇO DE TRABALHO DISPONÍVEL,
DURANTE OPERAÇÃO DE FRESAMENTO DE ACABAMENTO,
APLICANDO MODELAGEM MATEMÁTICA

Tese apresentada à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para a obtenção
do título de Doutor em Engenharia.

Área de concentração:

Engenharia Mecânica de Projeto e Fabricação

Orientador:

Prof. Dr. Tarcísio Antonio Hess Coelho

São Paulo

2009

DEDICATÓRIA

À minha amada esposa Lucimara pelo seu constante apoio e paciência e a meus queridos pais Ernst e Inge pelo seu incansável incentivo, graças aos quais consegui a concentração e a perseverança necessárias para a realização desta obra.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Tarcísio Antônio Hess Coelho, pelos seus valiosos ensinamentos e sua imprescindível orientação durante todas as fases deste trabalho.

A todos aqueles que de alguma forma me ajudaram a tornar possível a elaboração da presente tese.

ABSTRACT

This thesis has the purpose to study the precision of a new robotic structure for milling operations, in substitution to the conventional serial machine-tools, specially the CNC milling machines and cutting centers. The proposed structure is based on the parallel kinematics concept and the precision analysis was realized, applying mathematical models, to obtain the positioning errors mapping of the cutting tool in the available workspace, during finishing milling operations. The motivation is on the search higher performances and the parallel robotic structures have several advantages to the serial structures: modular construction, lightness, high velocities/acelerations. Otherwise, there are still problems to be solved, like: guaranty of precision, workspace optimization and reduction/elimination of singularities.

The methodology applied for the development of this work involves four steps: the proposal of a new robotic structure developed using existing synthesis methods; the development of mathematical models to characterize its kinematic behavior; the error sources identification that influences the deviation of the tool position; the elaboration of mathematical models and computer algorithms to analyse the influence level of each identified error source.

We developed one assymmetric robotic structure $2UPS+PRP$, with the following characteristics: mobility 3 with three translations in the space, reduced number of componentes and displacement in z direction independent from the displacents in the x and y directions. We presented the computer algorithms to map the kinematic, geometric and elastic errors, throw the discretization of the available workspace, based on the Jacobian matrices and the virtual work principle.

With regard to the tool position deviation mappings obtained, we reach to some conclusions. The major kinematic errors occurred when the imprecisions imposed to the two lateral actuatores had opposed signals. The geometric errors with dimensional tolerances in the *IT5* work class, were the more relevant among the considered errors. The elastic errors, considering finishing manufacturing forces, were the less relevent among the considered errors, being expressive the influence of the rigidity of the universal and spherical jounts. The utilization of the virtual work principle and concentrated rigidity parameters, showed to be efficacious and efficient, compared to the *SMA* (astructural matrice analisis) and the *FEM* (finite elements methode), because of the minor work to develop its formulations end the reduced computer time to its prosecution.

Keywords: precision, machine-tool, milling process, parallel robot.

RESUMO

Esta tese tem por objetivo estudar a precisão de uma nova estrutura robótica para operações de fresamento, em substituição às convencionais máquinas-ferramentas seriais, especialmente as fresadoras e os centros de usinagem CNC. A estrutura proposta está baseada no conceito da cinemática paralela, tendo a análise da precisão sido realizada em função do mapeamento dos erros de posicionamento da ferramenta de corte dentro do espaço de trabalho disponível, durante operação de fresamento de acabamento, aplicando modelagem matemática. A motivação está na busca por altos desempenhos e as estruturas robóticas paralelas possuem diversas vantagens perante as estruturas seriais: construção modular, massa reduzida, altas velocidades/acelerações. Por outro lado, há ainda problemas a serem solucionados, como: garantia da precisão, otimização do espaço de trabalho e redução/eliminação de singularidades.

A metodologia aplicada no desenvolvimento deste trabalho compreende quatro etapas: a proposta de uma nova estrutura robótica desenvolvida a partir de métodos de síntese existentes; o desenvolvimento de modelos matemáticos para caracterizar o seu comportamento cinemático; a identificação das fontes de erro que influenciam no desvio de posição da ferramenta; a elaboração de modelos matemáticos e algoritmos computacionais para analisar o grau de influência de cada fonte de erro identificada.

Desenvolvemos uma estrutura robótica de topologia assimétrica $2UPS+PRP$, com as seguintes características: mobilidade 3 com três translações no espaço, reduzido número de componentes e movimento na direção z independente dos movimentos nas direções x e y . Apresentamos os algoritmos computacionais para mapear os erros cinemáticos, geométricos e elásticos através da discretização do espaço de trabalho disponível, baseado nas matrizes Jacobianas e no princípio do trabalho virtual.

Com relação aos mapeamentos dos desvios de posição da ferramenta obtidos, chegamos a algumas conclusões. Os maiores erros cinemáticos ocorreram quando as imprecisões impostas aos dois membros motores laterais tinham sinais contrários. Os erros geométricos com tolerâncias dimensionais na classe de trabalho *IT5*, foram os mais relevantes dentre os erros considerados. Os erros elásticos, considerando forças de usinagem de acabamento, foram os menos relevantes entre os erros considerados, sendo expressiva a influência da rigidez das juntas universais e esféricas. A utilização do princípio do trabalho virtual, com parâmetros de rigidez concentrados, mostrou ser eficaz e eficiente, comparado ao *SMA* (análise da matriz estrutural) e ao *FEM* (método dos elementos finitos), devido ao menor trabalho para o desenvolvimento da sua formulação e ao tempo computacional reduzido para o seu processamento.

Palavras-chave: precisão, máquina-ferramenta, processo de fresamento, robô paralelo.

SUMÁRIO

TÍTULO

LISTA DE SÍMBOLOS

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Apresentação	1
1.2	Motivação	3
1.3	Objetivo	3
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1	Fundamentos acerca de estruturas robóticas paralelas	5
2.2	Comparações entre estruturas seriais , paralelas e híbridas	8
2.3	Classificação topológica de estruturas robóticas paralelas	16
2.4	Síntese topológica para estruturas robóticas paralelas	18
2.5	Análise cinemática de estruturas robóticas paralelas	22
2.6	Jacobianos – erros e singularidades em estruturas robóticas paralelas	23
2.7	Espaço de trabalho de estruturas robóticas paralelas	26
2.8	Avaliação do desempenho de estruturas robóticas paralelas	27
2.8.1	Erros por deformações elásticas	28
2.8.2	Erros por imprecisões geométrica e cinemáticas	35
2.8.3	Erros por dilatações térmicas	40
2.9	Comentários acerca da revisão bibliográfica	41
3	METODOLOGIA PARA O DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO	42
3.1	Síntese da estrutura robótica paralela	42
3.2	Desenvolvimento de modelos matemáticos da estrutura paralela	43
3.3	Identificação das prováveis fontes de erro	43
3.4	Desenvolvimento de modelos que quantifiquem cada uma das fontes de erro consideradas	44
4	SÍNTESE DA ESTRUTURA ROBÓTICA PARALELA	45
4.1	Método alternativo de síntese	45
4.2	Descrição da estrutura robótica paralela	46
4.3	Verificação da mobilidade e conectividade da estrutura paralela sintetizada	48
4.4	Discussão	48
5	ANÁLISE CINEMÁTICA DA ESTRUTURA PARALELA 2UPS+PRP	52
5.1	Coordenadas de localização da ferramenta e deslocamentos dos atuadores	52

5.2	Análise de posições: cinemática inversa e direta	55
5.3	Análise de velocidades e configurações singulares	58
5.4	Método para avaliação do espaço de trabalho	63
5.5	Discussão	70
6	ANÁLISE DOS ERROS CINEMÁTICOS DA ESTRUTURA PARALELA 2UPS+PRP	72
6.1	Relação entre os erros de posicionamento da ferramenta e os associados aos atuadores	72
6.2	Cálculo dos erros cinemáticos	73
6.3	Mapeamento dos erros cinemáticos	74
6.4	Discussão	81
7	ANÁLISE DOS ERROS GEOMÉTRICOS DA ESTRUTURA PARALELA 2UPS+PRP	86
7.1	Relação entre os erros de posicionamento da ferramenta e os erros associados às imprecisões na localização das juntas nos membros ativos	88
7.2	Cálculo dos erros geométricos	91
7.3	Mapeamento dos erros geométricos	91
7.4	Análise da sensibilidade aos parâmetros da estrutura paralela	97
7.5	Discussão	100
8	ANÁLISE DOS ERROS ELÁSTICOS DA ESTRUTURA PARALELA 2UPS+PRP	104
8.1	Desenvolvimento do modelo para avaliação do erro elástico	104
8.2	Cálculo da rigidez de cada um dos membros ativos	109
8.3	Cálculo da força de usinagem	114
8.4	Mapeamento dos erros elásticos	119
8.5	Discussão	126
9	VALIDAÇÕES DOS MODELOS MATEMÁTICOS	128
9.1	Validação dos modelos geométrico e cinemático de posição	128
9.2	Validação do modelo elástico de posição	132
10	CONCLUSÃO	144
11	TRABALHOS FUTUROS	147
12	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	149
	APÊNDICE A – MAPEAMENTOS DOS ERROS DA ESTRUTURA 2UPS+PRP	155
	APÊNDICE B – LISTAGEM DO PROGRAMA DA ESTRUTURA 2UPS+PRP	204

LISTA DE SÍMBOLOS

α_c	Ângulo de incidência do dente da fresa
β	Curso da junta universal
β_c	Ângulo de corte do dente da fresa
γ_c	Ângulo de saída do dente da fresa
$\delta\pi$	Desvio dos parâmetros geométricos
$\delta\theta$	Desvio angular da plataforma móvel no ponto P em coordenadas cilíndricas
δH	Desvio da posição vertical da plataforma móvel no ponto P em coordenadas cilíndricas
δP	Desvio da posição do ponto P localizado na plataforma móvel em coordenadas cartesianas
δR	Desvio radial da posição da plataforma móvel no ponto P em coordenadas cilíndricas
δ_q	Erro dos atuadores
δ_p	Erro de posicionamento da plataforma móvel
χ	Matriz de rigidez local dos atuadores ou membros motores
κ	Índice de condicionamento
κ_E	Índice de condicionamento pela norma Euclidiana
K_r	Ângulo da aresta de corte da fresa com a peça usinada
λ	Índice da ordem do espaço de trabalho (bi ou tridimensional)
λ_i	Menor autovalor não negativo
λ_s	Maior autovalor não negativo
φ_{c0}	Ângulo de contato entre a fresa e a peça usinada
φ_C	Ângulo de atuação da força de corte adotado pelo autor
φ	Curso da junta esférica
σ_e	Limite de resistência ao escoamento
Π	Vetor de parâmetros geométricos
θ	Orientação angular da plataforma móvel em torno ao eixo z e com posição inicial sobre o eixo x
a_e	Penetração de trabalho no fresamento
A	Área transversal

a_p	Profundidade de corte no fresamento
C	Junta cilíndrica, Conectividade
$c\theta$	Cosseno do ângulo θ
C_k	Conectividade parcial
C_T	Conectividade total
d	Diâmetro
de	Diâmetro externo
D_f	Diâmetro da fresa
di	Diâmetro interno
E	Módulo de elasticidade
f	Vetor de funções nulas
F	Força atuante no ponto P da plataforma móvel
F_c	Força de corte
F_f	Força de avanço
F_u	Força de usinagem
f_f	Avanço por rotação da fresa
F_t	Componente tangencial da força de usinagem atuante
F_r	Componente radial da força de usinagem atuante
F_x	Componente da força de usinagem atuante na direção x
F_y	Componente da força de usinagem atuante na direção y
F_z	Componente da força de usinagem atuante na direção z
f_z	Avanço da fresa por dente
GL	Graus de liberdade
h	Deslocamento fornecido pelo atuador ou membro motor
H	Posição vertical do ponto P na plataforma móvel em coordenadas cilíndricas, junta helicoidal
h_c	Espessura do cavaco
I	Matriz identidade
ICG	Índice de condicionamento global
IG	Índice de desempenho global
IT	Qualidade de trabalho (International Tolerance)
J	Jacobiano, matriz jacobiana
$J\pi$	Matriz jacobiana dos parâmetros geométricos

Jc	Matriz jacobiana cinemática total
Jg	Matriz jacobiana geométrica total
Jp	Matriz jacobiana da plataforma móvel
Jq	Matriz jacobiana das juntas motoras
k	Rigidez
K_C	Força de corte específica segundo Kienzle
K_{CII}	Força de corte específica para cavaco de secção igual a 1mm^2 segundo Kienzle
K	Matriz de rigidez dos membros motores no sistema global
L_f	Largura da fresa
ls	Coordenada do centro da junta esférica
lu	Coordenada do centro da junta universal
m	Número de membros ativos
M	Mobilidade
m_c	Coeficiente do material usinado segundo Kienzle
n	Número total de elos
N	Número total de pontos pertencentes ao espaço de trabalho
n_f	Rotação da fresa
n_{pj}	Número de juntas que permite j graus de liberdade
P	Posição da ferramenta na plataforma móvel, junta prismática
p	Vetor de localização da plataforma móvel
\dot{p}	Vetor de velocidade da plataforma móvel
q	Vetor de deslocamentos impostos pelas juntas motoras
\dot{q}	Vetor de velocidades das juntas motoras
R	Posição radial do ponto P na plataforma móvel em coordenadas cilíndricas, junta de revolução
S	Sensibilidade média, junta esférica
$s\theta$	Seno do ângulo θ
V	Volume do espaço de trabalho
v_i	Versor posição de montagem das juntas universais JU_i
vc	Velocidade de corte
v_f	Velocidade de avanço
W	Espaço de trabalho funcional

U	Junta universal
w_i	Versor posição de montagem das juntas esféricas JS_i
Z_f	Número de dentes da fresa

LISTA DE FIGURAS

- 1.1 - Torno CNC Centur 30D da ROMI.
- 1.2 - Modelo de uma estrutura cinemática paralela segundo Stewart.
- 2.1 - Cadeias cinemáticas, (HESS-COELHO, 2005). a) aberta; b) fechada.
- 2.2 - Esquema de estrutura robótica de cinemática paralela (HESS-COELHO, 2005).
- 2.3 - Fresadora CNC Universal MH-700C MAHO.
- 2.4 - Centro de usinagem “VMC 135E”, (RASZL e HESS-COELHO, 2005).
- 2.5 - Estrutura paralela: (a) primeiro simulador de vôo construído por Claus Cappel na década de 1960; (b) simulador de entretenimento “MD-11”, (HESS-COELHO, 2008).
- 2.6 Manipulador pega-e-põe IRB 340 FlexPicker da ABB, (HESS-COELHO, 2005).
- 2.7 - Máquina-ferramenta paralela Cosmos Center PM-600 de 5 eixos da Okuma (MERLET, 2006b).
- 2.8 - Estrutura robótica paralela hexapode CMW 300 da CMW, (RASZL e HESS-COELHO, 2005).
- 2.9 - Estrutura robótica paralela tripode Ulysses da Fatronik, (RASZL e HESS-COELHO, 2005).
- 2.10 - Máquina-ferramenta híbrida Tricept 805 da SMT, (RASZL e HESS-COELHO, 2005).
- 2.11 - Modelos cinemáticos de estruturas paralela simétricas: (a) $6\underline{U}PS$ (STEWART, 1966), (b) $6\underline{R}US$ (BONEV e GOSSELIN, 2000).
- 2.12 - Esquemas de estruturas paralelas assimétricas (HESS-COELHO, 2008): (a) $3\underline{U}PS+CP$; (b) $3\underline{P}US+CP$.
- 2.13 - Mecanismo paralelo $RRRRRR$ (HESS-COELHO, 2008).
- 2.14 - Mecanismo paralelo $3\underline{R}RR$ (HESS-COELHO, 2005).
- 2.15 - Estrutura paralela Neos-Tricept da ABB, (HESS-COELHO, 2005): a) foto; b) modelo cinemático.
- 2.16 - Estrutura paralela $2\underline{R}US+\underline{P}RP$ (HESS-COELHO, 2007).
- 2.17 - Configuração singular de movimento incontrollável no interior do espaço de trabalho, em um mecanismo plano $\underline{R}RRRR$ (HESS-COELHO, 2005).
- 2.18 - Configuração singular de redução de movimento, limitando o espaço de trabalho, em um mecanismo plano $\underline{R}RRRR$ (HESS-COELHO, 2005).

- 2.19 - Espaço de trabalho. a) Delta 4 (STAMPER et al, 1997); b) Tricept (XI et al, 2004).
- 2.20 - Estrutura paralela Ortoglide (MAJOU et al, 2006): (a) foto; (b) modelo cinemático.
- 2.21 - Estrutura paralela Isoglide (RIZK et al., 2007) : (a) **3-T3** ; (b) **4-T3R1**.
- 2.22 - Tripode **3PRS**. (XI et al.,2004).
- 2.23 - Estruturas paralelas (XI et al., 2004): a) Tricept; b) George V; (c) Z3.
- 2.24 - Elipsóide de manipulabilidade, (MERLET, 2007).
- 2.25 - Estrutura paralela (BRIOT e BONEV, 2007): (a) **3 RPR**; (b) **3 PRP** .
- 2.26 - Influência dos parametros geométricos e cinemáticos na posição final do manipulador da Ortoglide (CARO et al., 2007).
- 2.27 - Estrutura paralela **3PRS** (VERNET et al., 2005) : (a) foto; (b) modelo cinemático.
- 2.28 - Efeitos da deformação elástica. a) dilatações térmicas unidirecionais; b) distribuição das temperaturas em função da entrada de calor.
- 2.29 - Fluxo de calor através de uma junta (RAMESH et al., 2000).
- 4.1 - Membro central e a plataforma móvel com a ferramenta.
- 4.2 - Estrutura robótica tridimensional com cinemática paralela assimétrica **2UPS+PRP**.
- 4.3 - Localização do motor da estrutura **2UPS+PRP**: (a) base fixa; (b) plataforma móvel.
- 4.4 - Diagramas cinemáticos das arquiteturas da família: (a) **2UPS+PRP**; (b) **2PUS+PRP**; (c) **2RUS+PRP**.
- 4.5 - Tricept IRB 940 da ABB (MERLET, 2006b).
- 4.6 – (a) Ortoglide (PASHKEVICH, 2005); (b) Tripteron (Laboratoire de Robotique Université Laval).
- 5.1 - Modelo cinemático da estrutura robótica **2UPS+PRP**, com indicação das coordenadas do ponto **P** (ferramenta) e os deslocamentos dos atuadores: (a) vista superior; (b) vista lateral.
- 5.2 - Configurações possíveis para **$h_2 = 1,544$ m**, **$h_1 = 0,620$ m** e **$h_3 = 0$ m**: (a) **$R = 1$ m** e **$\theta = 30^\circ$** ; (b) **$R = 0,5$ m** e **$\theta = 83^\circ$** .
- 5.3 - Configurações da estrutura paralela quando: (a) **$h_1 = 0$** ; (b) **$h_2 = 0$** ; (c) **$h_1 = h_2 = 0$** .

- 5.4 - Notação empregada para formulação alternativa da análise de velocidades.
 (a) vista superior no plano π ; (b) vista espacial de h_1 ; (c) vista espacial de h_2 .
- 5.5 – (a) Configuração singular obtida quando $\det \mathbf{Jp} = 0$; (b) P em movimento e se aproximando da posição singular.
- 5.6 - Fluxograma do algoritmo para avaliação do espaço de trabalho.
- 5.7 - Membro lateral destacando as juntas esférica e universal.
- 5.8 - Junta universal.
- 5.9 - Espaço de trabalho teórico, baseado na posição de referência $\mathbf{H} = \mathbf{0}$, sem mostrar a sua redução conforme se afasta de $\mathbf{H} = \mathbf{0}$.
- 5.10 - Superfícies de trabalho: (a) para $H = 0$ mm; (b) para $H = 120$ mm; (c) para $H = 240$ mm; (d) para $H = 360$ mm; (e) para $H = 480$ mm; (f) para $H = 600$ mm.
- 6.1 - Estrutura robótica $2UPS+PRP$ com erros cinemáticos nas direções: (a) x_b e (b) y_b .
- 6.2 - Erro cinemático referente ao posicionamento do ponto P , na direção x_b , considerando situação simétrica, sendo $dh_1 = dh_2 = dh_3 = 5 \mu\text{m}$:
 (a) para $H = 0$ mm; (b) para $H = 120$ mm; (c) para $H = 240$ mm;
 (d) para $H = 360$ mm; (e) para $H = 480$ mm; (f) para $H = 600$ mm.
- 6.3 - Erro cinemático referente ao posicionamento do ponto P , na direção y_b , considerando situação simétrica, sendo $dh_1 = dh_2 = dh_3 = 5 \mu\text{m}$:
 (a) para $H = 0$ mm; (b) para $H = 120$ mm; (c) para $H = 240$ mm;
 (d) para $H = 360$ mm; (e) para $H = 480$ mm; (f) para $H = 600$ mm.
- 6.4 - Erro cinemático referente ao posicionamento do ponto P , na direção x_b , considerando situação assimétrica, sendo $dh_1 = -dh_2 = dh_3 = 5 \mu\text{m}$:
 (a) para $H = 0$ mm; (b) para $H = 120$ mm; (c) para $H = 240$ mm;
 (d) para $H = 360$ mm; (e) para $H = 480$ mm; (f) para $H = 600$ mm.
- 6.5 - Erro cinemático referente ao posicionamento do ponto P , na direção y_b , considerando situação assimétrica, sendo $dh_1 = -dh_2 = dh_3 = 5 \mu\text{m}$:
 (a) para $H = 0$ mm; (b) para $H = 120$ mm; (c) para $H = 240$ mm;
 (d) para $H = 360$ mm; (e) para $H = 480$ mm; (f) para $H = 600$ mm.
- 6.6 - Erro cinemático referente ao posicionamento do ponto P , na direção x_b , considerando situações simétricas e assimétricas para $H = 0$ mm e $dh_3 = 5 \mu\text{m}$:
 (a) para $dh_1 = dh_2 = 5 \mu\text{m}$; (b) para $dh_1 = dh_2 = -5 \mu\text{m}$;
 (c) para $dh_1 = -dh_2 = 5 \mu\text{m}$; (d) para $-dh_1 = dh_2 = 5 \mu\text{m}$.

- 6.7 - Erro cinemático referente ao posicionamento do ponto P , na direção y_b , considerando situações simétricas e assimétricas para $H = 0$ mm e $dh_3 = 5$ μ m:
- (a) para $dh_1 = dh_2 = 5$ μ m; (b) para $dh_1 = dh_2 = -5$ μ m;
- (c) para $dh_1 = -dh_2 = 5$ μ m; (d) para $-dh_1 = dh_2 = 5$ μ m.
- 6.8 - Caso particular para interpretação dos erros.
- 6.9 - Mapeamento do erro na direção x_b , para $H = 0$ m, $dh_1 = dh_2 = 5$ μ m, $ls = 0,2$ m, $lu = 2.ls$, sem restrição dos cursos das juntas.
- 7.1 - Estrutura robótica $2UPS+PRP$ com erros geométricos nas direções: (a) x_b e (b) y_b .
- 7.2 - Erro geométrico referente ao posicionamento do ponto P , na direção x_b , com tolerâncias simétricas: (a) para $H = 0$ mm; (b) para $H = 120$ mm; (c) para $H = 240$ mm; (d) para $H = 360$ mm; (e) para $H = 480$ mm; (f) para $H = 600$ mm.7.12: Erro de posição δ_x na superfície de trabalho localizada em $Z = 300$ mm.
- 7.3 - Erro geométrico referente ao posicionamento do ponto P , na direção y_b , com tolerâncias simétricas: (a) para $H = 0$ mm; (b) para $H = 120$ mm; (c) para $H = 240$ mm; (d) para $H = 360$ mm; (e) para $H = 480$ mm; (f) para $H = 600$ mm.7.14: Erro de posição δ_x na superfície de trabalho localizada em $Z = 500$ mm.
- 7.4 - Erro geométrico referente ao posicionamento do ponto P , na direção x_b , com tolerâncias assimétricas: (a) para $H = 0$ mm; (b) para $H = 120$ mm; (c) para $H = 240$ mm; (d) para $H = 360$ mm; (e) para $H = 480$ mm; (f) para $H = 600$ mm.7.16: Erro de posição δ_y na superfície de trabalho localizada em $Z = 0$ mm.
- 7.5 - Erro geométrico referente ao posicionamento do ponto P , na direção y_b , com tolerâncias assimétricas: (a) para $H = 0$ mm; (b) para $H = 120$ mm; (c) para $H = 240$ mm; (d) para $H = 360$ mm; (e) para $H = 480$ mm; (f) para $H = 600$ mm.7.18: Erro de posição δ_y na superfície de trabalho localizada em $Z = 200$ mm.
- 7.6 - Sensibilidade média aos parâmetros 1 a 12, em relação a $d\theta$:
- (a) para $H = 0$ mm; (b) para $H = 120$ mm; (c) para $H = 240$ mm; (d) para $H = 360$ mm; (e) para $H = 480$ mm; (f) para $H = 600$ mm.
- 7.7 - Sensibilidade média aos parâmetros 1 a 12, em relação a dR :
- (a) para $H = 0$ mm; (b) para $H = 120$ mm; (c) para $H = 240$ mm;

- (d) para $H = 360$ mm; (e) para $H = 480$ mm; (f) para $H = 600$ mm.
- 7.8 - Fusos de rolamentos de esferas com castanha (junta prismática).
- 7.9 - Juntas mecânicas: (a) universal; (b) esférica.
- 8.1 - Representação simplificada da estrutura $2UPS+PRP$, para desenvolvimento do modelo elástico.
- 8.2 - Forças atuantes nas molas de rigidez k_1 , k_2 e k_3 .
- 8.3 - Força \vec{F} atuante no ponto P e os vetores $\vec{\rho}$, $\vec{\tau}$, \hat{i} , \hat{j} e \hat{k} .
- 8.4 - Determinação da rigidez dos membros laterais: (a) modelo cinemático; (b) modelo elástico.
- 8.5 - Vista em corte do membro lateral, para determinação da rigidez do fuso.
- 8.6 - Vista do membro central, para determinação da rigidez do fuso.
- 8.7 - Exemplo de processo de fresamento.
- 8.8 - Oscilação da força de usinagem.
- 8.9 - Vista superior da composição da força de usinagem.
- 8.10 - Fresamento: (a) na direção x_b ; (b) na direção y_b .
- 8.11 - Estrutura robótica $2UPS+PRP$ com erros elásticos nas direções: (a) x_b e (b) y_b .
- 8.12 - Erro elástico referente ao posicionamento do ponto P na direção x_b e movimento de avanço na direção x_b : (a) para $H = 0$ mm; (b) para $H = 120$ mm; (c) para $H = 240$ mm; (d) para $H = 360$ mm; (e) para $H = 480$ mm; (f) para $H = 600$ mm.
- 8.13 - Erro elástico referente ao posicionamento do ponto P na direção y_b e movimento de avanço na direção x_b : (a) para $H = 0$ mm; (b) para $H = 120$ mm; (c) para $H = 240$ mm; (d) para $H = 360$ mm; (e) para $H = 480$; (f) para $H = 600$ mm.
- 8.14 - Erro elástico referente ao posicionamento do ponto P na direção x_b e movimento de avanço na direção y_b : (a) para $H = 0$ mm; (b) para $H = 120$ mm; (c) para $H = 240$ mm; (d) para $H = 360$ mm; (e) para $H = 480$; (f) para $H = 600$ mm.
- 8.15 - Erro elástico referente ao posicionamento do ponto P na direção y_b e movimento de avanço na direção y_b : (a) para $H = 0$ mm; (b) para $H = 120$ mm; (c) para $H = 240$ mm; (d) para $H = 360$ mm; (e) para $H = 480$ mm; (f) para $H = 600$ mm.
- 9.1 - Superfície de trabalho para $H = 0$ mm, com cotas em centímetros, obtida através

de programa para desenhos AUTOCAD.

- 9.2 - Superfície de trabalho em $H = 0$ mm, obtida com MATLAB.
- 9.3 - Situações de aferição dos modelos geométrico e cinemático.
- 9.4 - Modelo para equacionamento geométrico.
- 9.5 - Posições de aferição do modelo de erro elástico.
- 9.6 - Pontos de fixação com deslocamento nulo.
- 9.7 - Posição 1 e força F_x , com deformação na direção do eixo x.
- 9.8 - Posição 1 e força F_y , com deformação na direção do eixo y.
- 9.9 - Posição 2 e força F_x , com deformação na direção do eixo x.
- 9.10 - Posição 2 e força F_y , com deformação na direção do eixo y.
- 9.11 - Posição 3 e força F_x , com deformação na direção do eixo x.
- 9.12 - Posição 3 e força F_y , com deformação na direção do eixo y.
- 9.13 - Posição 4 e força F_x , com deformação na direção do eixo x.
- 9.14 - Posição 4 e força F_y , com deformação na direção do eixo y.
- 9.15 - Erros elásticos δ_x e δ_y para $F_x = 100$ N e $F_y = 0$ N: (a) posição 1; (b) posição 2; (c) posição 3; (d) posição 4.
- 9.16 - Erros elásticos δ_x e δ_y para $F_x = 0$ N e $F_y = 100$ N: (a) posição 1; (b) posição 2; (c) posição 3; (d) posição 4.
- 10.1 - Esquema de estrutura robótica 2UPS+PRP com configuração “estrela”.

LISTA DE TABELAS

- 2.1 - Tipos de elos e suas representações esquemáticas.
- 2.2 - Tipos de juntas (SUH e RADCLIFFE, 1978).
- 2.3 - Dados técnicos do centro de usinagem “VMC 135E”.
- 2.4 - Dados técnicos da estrutura paralela hexapode CMW 300 da CMW.
- 2.5 - Dados técnicos da estrutura paralela tripode Ulysses da Fatronik.
- 2.6 - Dados técnicos da máquina-ferramenta híbrida Tricept 805 da SMT.
- 2.7 - Comparativo entre estruturas seriais, paralelas e híbridas.
- 5.1 - Parâmetros adotados para a análise da estrutura robótica paralela $2UPS+PRP$.
- 5.2 - Limites dos cursos das juntas prismáticas, assim como universais e esféricas utilizados no estudo (CATÁLOGO INA,1966).
- 6.1 - Comparação entre os métodos para o cálculo de dP_x^c e dP_y^c , para $R = 1$ m,
 $\theta = 20^\circ$, $H = 0$ m, $dh_1 = -dh_2 = 5$ μ m.
- 6.2 - Desvios percentuais associados aos valores de dP_x^c e dP_y^c , referentes à tabela 6.1.
- 6.3 - Comparação entre os métodos para o cálculo de dP_x^c e dP_y^c , para $R = 1$ m,
 $\theta = 20^\circ$, $dh_1 = dh_2 = 5$ μ m.
- 6.4 - Desvios percentuais associados aos valores de dP_x^c e dP_y^c , referentes à tabela 6.3.
- 7.1 - Tolerâncias referentes aos parâmetros da estrutura paralela $2UPS+PRP$.
- 8.1 - Materiais da estrutura robótica $2UPS+PRP$.
- 8.2 - Ferramenta de corte utilizada na simulação do processo de fresamento.
- 8.3 - Condições de operação utilizados na simulação do processo de fresamento.
- 8.4 - Material da peça usinada na simulação do processo de fresagem.
- 9.1 - Dados dimensionais para aferição do modelo de erro cinemático.
- 9.2 - Resultados comparativos das aferições do modelo cinemático de posição.
- 9.3 - Posições dadas para aferição do modelo de erro elástico.
- 9.4 - Forças aplicadas no ponto P da plataforma móvel.
- 9.5 - Resultados comparativos das aferições do modelo elástico de posição.

