



ANÁLISE E SIMULAÇÃO DO SISTEMA EXPERIMENTAL DA ESTRUTURA PARALELA 6-RSS

Rogério Sales Gonçalves

Laboratório de Automação e Robótica
Faculdade de Engenharia Mecânica – Universidade Federal de Uberlândia
Campus Santa Mônica
CEP 38400-902 Uberlândia-MG-Brasil
rsgoncalves@mecanica.ufu.br

João Carlos Mendes Carvalho

jcmendes@mecanica.ufu.br

Resumo: *Este trabalho apresenta a arquitetura da estrutura paralela 6-RSS e o estudo do número de graus de liberdade desta estrutura. Simulações gráficas permitiram confirmar os resultados obtidos pelo modelo matemático. A partir das simulações gráficas foi possível definir os parâmetros de construção do protótipo. Neste trabalho também é descrito o protótipo construído. Finalmente são apresentados os resultados da análise dos limites de movimentação da estrutura e uma seção do volume de trabalho.*

Palavras-chave: *Robótica, Estruturas Paralelas, Simulação Gráfica, Estruturas 6-RSS.*

1. INTRODUÇÃO

Os robôs industriais têm sido construídos, desde o seu surgimento, a partir de uma arquitetura antropomórfica, semelhante ao braço humano. Isto se deve, em parte, à idéia inicial de que o robô deveria ser um sistema mecânico capaz de realizar os mesmos tipos de tarefas que o homem e com a mesma habilidade. Entretanto, viu-se, após inúmeras pesquisas e aplicações práticas, que o sonho de se construir uma máquina robótica semelhante ao homem e com a mesma habilidade não seria uma tarefa evidente. Pode-se enumerar diversos elementos que justificam esta dificuldade. No entanto, ficaremos nas dificuldades diretamente ligadas a este projeto de pesquisa. Assim, um dos problemas está relacionado com a forma de controle: o comando do robô controla ângulos (articulações de rotação) para a execução de trajetórias e tarefas planejadas utilizando-se de coordenadas cartesianas (ou outras associadas a elas). Então, o modelo matemático consiste em um sistema não linear com funções trigonométricas altamente acopladas, tornando praticamente impossível sua solução em tempo real. Isto faz com que a grande maioria dos sistemas de comando atualmente existentes, utiliza o controle do tipo ponto-a-ponto, onde o órgão terminal, que porta a ferramenta, descreve uma trajetória discretizada, partindo de cada ponto com velocidade nula e atingindo o consecutivo também com velocidade nula. O outro problema está relacionado com a inércia: partindo do órgão terminal, cada acionador deve suportar não só a carga manipulada mas também o peso da estrutura e do acionador consecutivo. Isto faz com que a estrutura seja reforçada para evitar as flexibilidades e sustentar todo o peso morto do sistema. Desta forma, obtém-se uma estrutura extremamente pesada para manipular cargas relativamente pequenas. Em robôs com acionamento elétrico, tem-se, em geral, uma relação de 27Kg de “robô” para cada 1Kg de carga manipulada. Tal construção compromete não só a eficiência massiva do robô como também cria problemas relativos à inércia ou seja, impedimento de se operar a altas velocidades e altas taxas de aceleração, pois podem surgir vibrações indesejadas na estrutura e no posto de trabalho, comprometendo a precisão.

Vários trabalhos de pesquisa têm sido realizados de forma a procurar soluções para estes tipos de problemas. Uma delas consiste em utilizar mecanismos articulados de cadeia fechada ao invés das atuais cadeias cinemáticas seriais. Esta arquitetura tem sido chamada de arquitetura paralela devido ao aparente paralelismo entre os elementos estruturais do mecanismo articulado e também em oposição às estruturas seriais.

A configuração típica das estruturas paralelas consiste em uma cadeia cinemática fechada onde os segmentos unem, simultaneamente, a base ao órgão terminal. Sendo que, em várias formas construtivas, os acionadores podem ser instalados em uma base fixa, tornando-a mais leve. Estas arquiteturas despertam grande interesse porque apresentam grande rigidez aliada à precisão e possuem capacidade de carga maior que as tradicionais arquiteturas seriais. Além disso podem operar a grandes velocidades sem apresentar os mesmos níveis de problemas inerciais que as arquiteturas seriais. Diversas estruturas paralelas têm sido propostas e estudadas tais como as apresentadas em Stewart (1965), Clavel (1988), Pierrot et al. (1991), Merlet e Gosselin (1991), Jacquet et al. (1992), Romiti e Sorli (1992), Lallemant et al. (1997), Coelho et al. (2001), Byun e Cho (1997) e Ceccarelli (1997). As aplicações são as mais variadas mas com um nítido direcionamento para as aplicações que requerem grandes velocidades de trabalho e/ou precisão, características que as arquiteturas seriais não possuem. Entretanto, as estruturas paralelas possuem pequeno volume de trabalho, e sua cinemática direta é geralmente complexa.

Como exemplo de aplicação destas estruturas, pode-se citar: manipuladores, simuladores de movimento, simuladores de vôo, simuladores de terremoto, punhos, sensores de força, centros de usinagem e brinquedos.

Este trabalho apresenta a análise do protótipo de uma estrutura paralela espacial do tipo 6-RSS (revolute-spheric-spheric), que possui 6 graus de liberdade (g.d.l.).

2. ESTRUTURA PARALELA 6-RSS

A arquitetura da estrutura paralela 6-RSS é caracterizada por uma base e uma plataforma móvel conectadas por seis segmentos RS-SS, onde as articulações de rotação R estão posicionadas, duas-a-duas, nos eixos Cartesianos, conforme apresentado na Fig. 1. O comprimento do antebraço e do braço são denominados respectivamente de S_i e L_i .

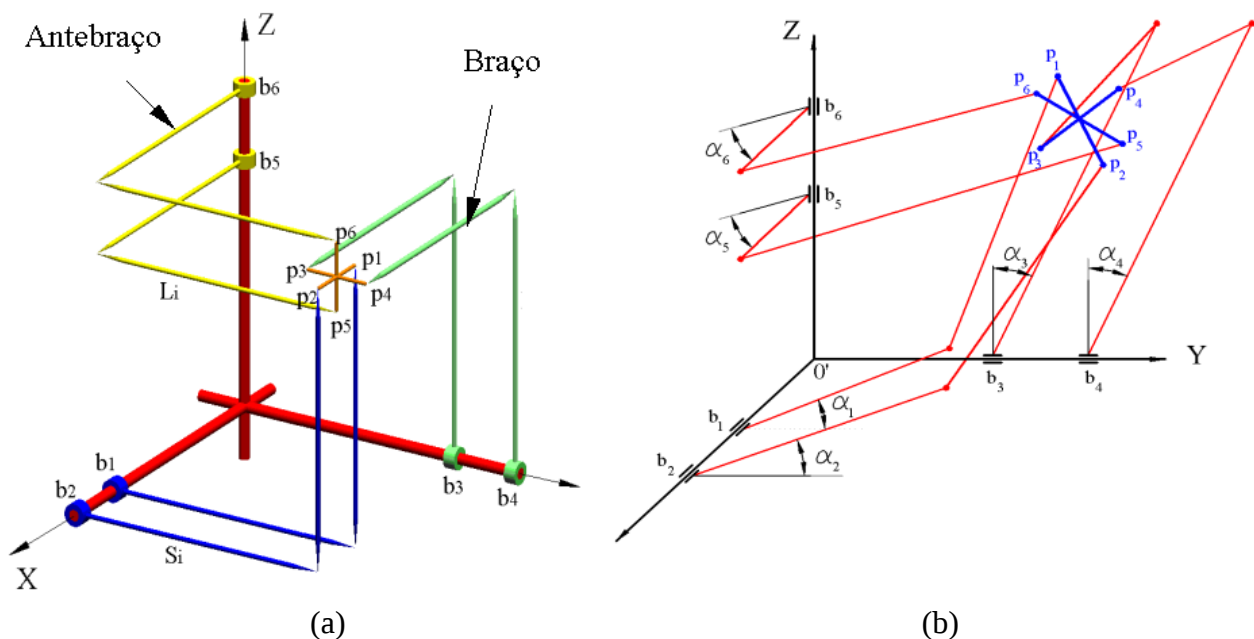


Figura 1: Parâmetros estruturais das estrutura paralela 6-RSS. a) Configuração inicial; b) Configuração genérica.

A base, onde os atuadores estão instalados, é constituída pelo sistema Cartesiano. Esta estrutura possui vantagens como: os acionadores são montados na base fixa e nenhum componente de transmissão mecânica (polias, engrenagens, cabos) está em movimento, reduzindo de forma considerável o problema de inércia; a sua construção é modular, permitindo a redução do custo de fabricação e, para uma mesma base de acionadores, pode-se utilizar diferentes composições de braços e antebraços, obtendo-se uma vasta gama de volume de trabalho. A plataforma móvel consiste em um cubo virtual onde as articulações esféricas S são conectadas no centro de cada face, sendo representada por três segmentos cruzados. As variáveis cinemáticas são os ângulos de entrada de movimento α_i ($i = 1, \dots, 6$) das articulações de rotação R. Na estrutura analisada, os segmentos RS e os segmentos SS têm o mesmo comprimento e $|b_1b_2| = |b_3b_4| = |b_5b_6| = |p_1p_2| = |p_3p_4| = |p_5p_6|$.

3. NÚMERO DE GRAUS DE LIBERDADE DA ESTRUTURA

A análise cinemática pode ser feita utilizando-se de uma análise vetorial adequada e operações matriciais (Bezerra e Carvalho, 1996, 1997 e 1998).

O número de graus de liberdade da estrutura, pode ser determinado utilizando o critério de Grübler-Kutzbach, dado pela Equação 1.

$$F = \lambda(n - g - 1) + \sum_{i=1}^g f_i - f_p \quad (1)$$

Na Equação 1, F é o número de graus de liberdade da estrutura, λ representa o número de g.d.l. do espaço onde a estrutura está inserida ($\lambda = 6$), n é o número total de segmentos, g representa o número de articulações, f_i representa o número de g.d.l. da i -ésima articulação e f_p a quantidade de g.d.l. passivos da estrutura. Para a estrutura 6-RSS tem-se: $f_p = 6$ (cada segmento SS possui um g.d.l. passivo), $n = 14$ (incluindo a base e a plataforma móvel), $g = 18$ (6 articulações de rotação e 12 esféricas) e $f_i = 42$ (cada articulação R tem 1 g.d.l e cada articulação S tem 3 g.d.l.). Substituindo estes valores na Equação 1 tem-se que a estrutura 6-RSS possui 6 g.d.l., descrevendo uma trajetória espacial.

4. PROTÓTIPO DA ESTRUTURA PARALELA 6-RSS

Com o objetivo de auxiliar na análise cinemática e dinâmica da estrutura 6-RSS, foi construído um protótipo. A estrutura deste protótipo foi projetada de forma modular permitindo que as dimensões e posições dos segmentos RS-SS sejam facilmente alteradas. Cada conjunto de perna é composto por um moto-reductor-encoder, articulações e segmentos. A plataforma móvel é construída em alumínio e os demais componentes mecânicos em aço. Para o sistema de controle é utilizada uma placa de controle via PC, com capacidade para controlar até seis motores simultaneamente. Trata-se de uma placa de controle de motores FlexMotion 5.0 (National Instruments) na qual, além dos motores, podem ser conectados até seis *encoders* e várias chaves de fim de curso. A placa de controle também dispõe de diversos canais digitais e analógicos de entrada e saída, os quais podem ser utilizados para a aquisição de sinais provenientes de sensores que retroalimentam o sistema.

Para cada perna tem-se: chave limite para rotação horária, chave limite de rotação anti-horária, chave limite que define a posição inicial, encoder, motor e sensores se necessário. A técnica de instrumentos virtuais foi utilizada na programação do movimento.

Na Figura 2 é apresentado todo o sistema e, na Figura 3, detalhes do conjunto moto-reductor-encoder e da plataforma móvel. Neste caso a plataforma móvel contém um apalpador que consiste em um transdutor de deslocamento linear do tipo LVDT. Ele está montado no centro da plataforma móvel da estrutura paralela 6-RSS.

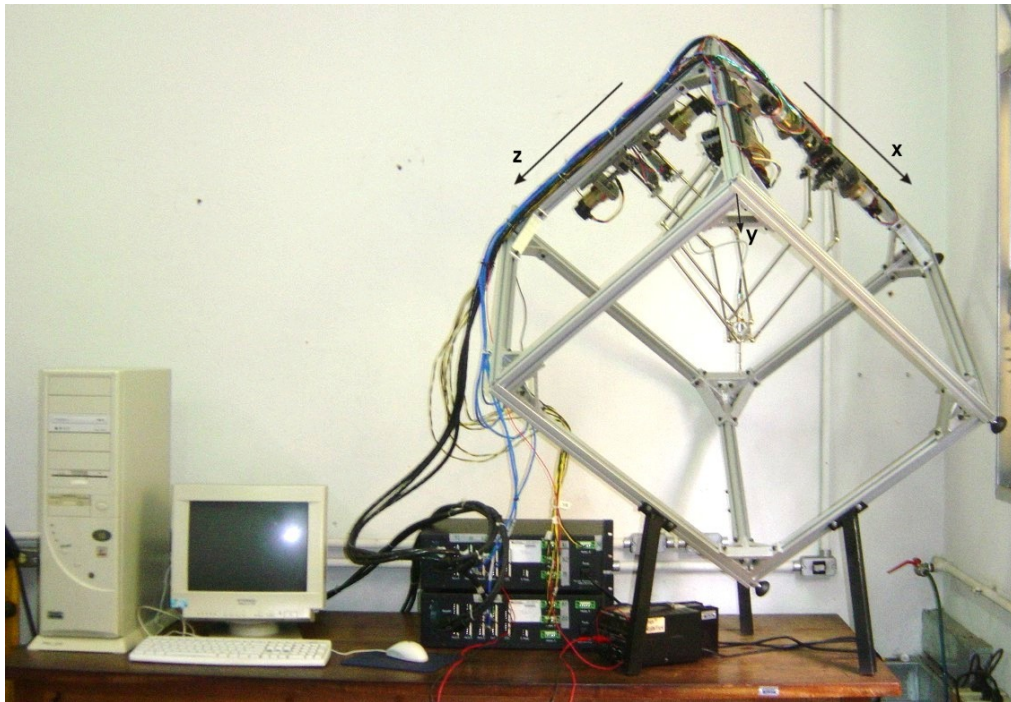
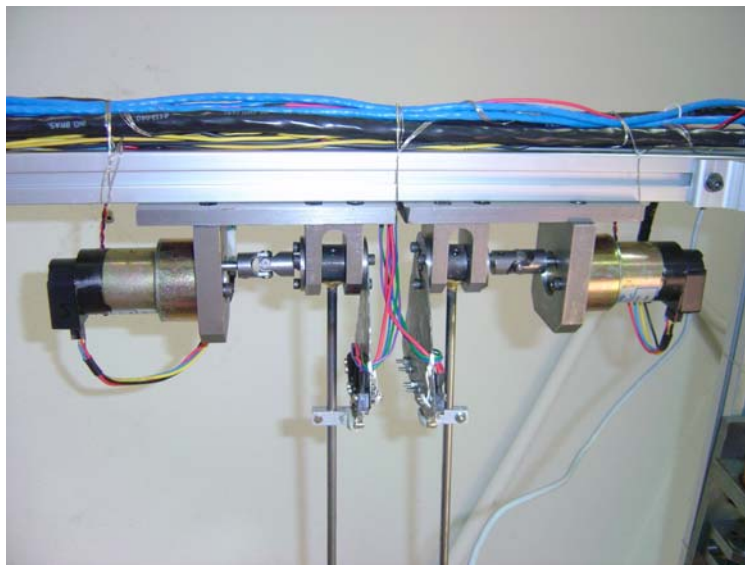


Figura 2: Conjunto da estrutura paralela 6-RRS com o seu sistema de controle.



(a) Detalhe do conjunto moto-redutor-encoder.



(b) Detalhe da plataforma móvel com um transdutor linear.

Figura 3: Detalhes da estrutura paralela 6-RRS.

Para permitir a análise do espaço de trabalho e verificar as interferências e possíveis colisões entre os segmentos da estrutura, foi elaborado uma simulação através do software Visual Nastran 4D[®]. Com o auxílio deste software, foi montado um modelo com as medidas correspondente ao projeto da Estrutura Paralela 6-RRS, conforme representado na Figura 4.

Este programa permite a entrada de valores como por exemplo os ângulos das articulações rotativas permitindo desta maneira a verificação da movimentação do órgão terminal da estação de trabalho. Outra possibilidade consiste na verificação dos limites de funcionamento dos atuadores sem ocorrer a colisão entre os segmentos. Pode-se também determinar o espaço de trabalho do apalpador. A Figura 5 representa algumas posições de interferência.

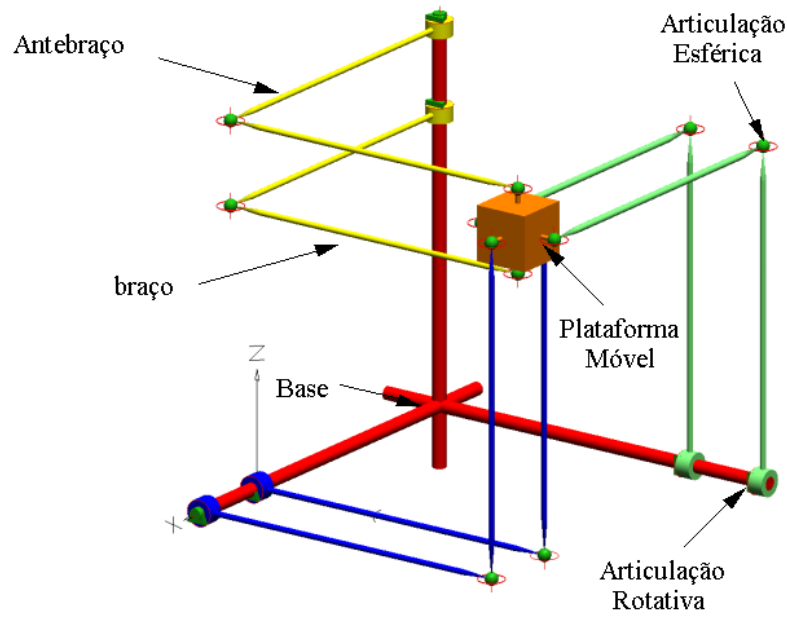
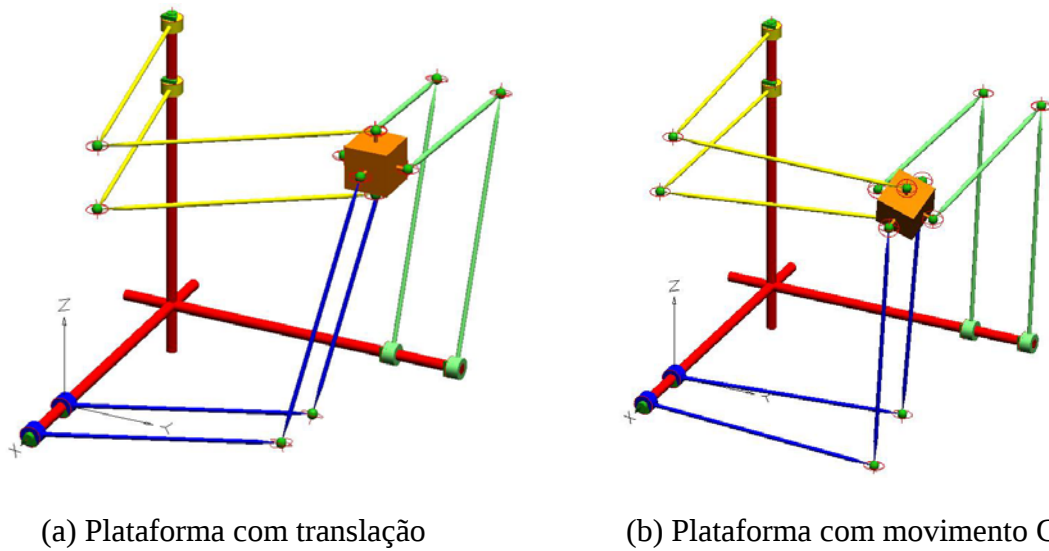


Figura 4: Modelo Computacional da Estrutura Paralela 6-RSS, posição inicial.



(a) Plataforma com translação

(b) Plataforma com movimento Geral

Figura 5: Modelo Computacional da plataforma móvel com translação pura e com movimento geral.

A análise cinemática permitiu definir parâmetros de limite de movimentação da estrutura para as dimensões utilizadas. Assim, os valores limites de rotação dos ângulos de entrada das pernas são:

$$\alpha_{\max} = +26,8^{\circ}; \alpha_{\min} = -21,1^{\circ}$$

e a máxima rotação da plataforma móvel é dada por:

$$R_x = 21,7^{\circ}, R_y = 31,3^{\circ}, R_z = 21,6^{\circ}.$$

Pode-se também constatar que o volume de trabalho é muito reduzido quando comparado com o volume ocupado pela estrutura.

As dimensões físicas do protótipo construído são: $|b_1b_2| = |b_3b_4| = |b_5b_6| = |p_1p_2| = |p_3p_4| = |p_5p_6| = 0,076\text{m}$ e $S_i = L_i = 0,3\text{m}$.

A posição da plataforma móvel, definida pelo seu centro, é acoplada com sua orientação. No estudo da estrutura paralela 6-RSS o volume de trabalho foi considerado no limite da colisão entre os segmentos e/ou entre os segmentos e a plataforma móvel. Foram realizadas simulações gráficas do movimento e confirmadas pelas equações cinemáticas. Na Figura 6 está representada uma vista do volume de trabalho com a plataforma móvel mantendo os eixos paralelos aos eixos Cartesianos.

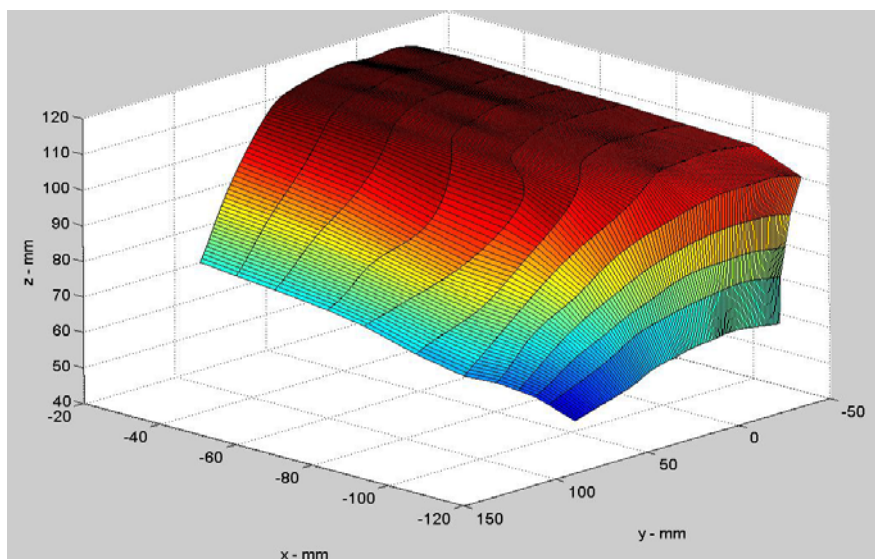


Figura 6: Volume de trabalho para os eixos da plataforma móvel movendo-se paralelos aos eixos Cartesianos.

5. CONCLUSÃO

As simulações gráficas apresentadas neste trabalho permitiram realizar o estudo das limitações de movimentação da estrutura paralela 6-RSS.

Testes realizados com o protótipo permitiram confirmar os limites de movimentação das pernas.

Foi verificado que o volume de trabalho é muito reduzido quando comparado com o volume ocupado pela estrutura.

Na sequência deste trabalho serão analisadas a rigidez e a modelagem dinâmica da estrutura.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à “FAPEMIG – Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais ” pelo apoio financeiro para o desenvolvimento deste trabalho, através do contrato TEC-759/01.

7. REFERÊNCIAS

- Bezerra, C.A.D., 1996, “Geometric Model of a Fully Cartesian Parallel Structure” (In Portuguese). MSc Thesis, Federal University of Uberlândia, Brazil.
- Bezerra, C.A.D., Carvalho, J.C.M., 1997, “Number of Degrees of Freedom Determination for a Fully Parallel Cartesian Structure” (In Portuguese). CD-Proc. of 16th Brazilian Congress of Mechanical Engineering, Bauru, Brazil.
- Bezerra, C.A.D., Carvalho, J.C.M., 1998, “Formulation of the Direct and Inverse Geometric Model of the Fully Parallel Cartesian Structure”. J. of the Brazilian Soc. of Mechanical Science and Engineering, Vol 20, N. 3, pp: 445-453.
- Byun, Y.K., Cho, H.S., 1997, “Analysis of a Novel 6-dof, 3-PPSP Parallel Manipulator”. The Int. J. of Robotics Research, Vol.16, No.6, pp.859-872.

- Ceccarelli, M., 1997, "A New 3 D.O.F. Parallel Spatial Mechanism". Mechanism and Machine Theory, Vol. 32, No. 8, pp. 895-902.
- Clavel, R., 1988, "DELTA: A Fast Robot with Parallel Geometry". Proc. of 18th Int. Symp. On Industrial Robots, Lausanne, pp.91-100.
- Coelho, T.A.H., Batalha, G.F., Moraes, D.T.B., Boczeko, M., 2001, "A Prototype of a Contour Milling Machine Based on a Parallel Kinematic Mechanism". Proc. of the 32nd Int. Symposium on Robotics, Seoul, Korea.
- Jacquet, P., Danescu, G., Carvalho, J.C.M., Dahan, M., 1992, "A Spatial Fully Parallel Manipulator", in Proceedings of *World Congress on the Theory of Machines and Mechanisms*, Udine.
- Lallemant, J.P., Goudali, A., Zeghloul, S., 1997, "The 6-dof 2-DELTA Parallel Robot". Robotica, Vol.15, pp.407-416.
- Merlet, J.P., Gosselin, C., 1991, "Nouvelle Architecture Pour Manipulateur Parallèle a Six Degrés de Liberté", Mechanism and Machine Theory **26**(1), pp.77-90.
- Pierrot, F., Dauchez, P., Fournier, A., 1991, "Hexa: A Fast Six-Dof Fully Parallel Robot". Proc. Of Int. Conference on Advanced Robotics , Pisa, pp.1159-1163.
- Romiti, A., Sorli, M., 1992, "A Parallel 6-dof Manipulator for Cooperative Work Between Robots in Deburring", in Proceedings of 23rd Int. Symp. on Industrial Robots, Barcelona, pp.437-444
- Stewart, D., 1965, "A Platform With Six Degrees of Freedom". Proc. of Institution of Mechanical Engineers, Vol.180, No.15, part I, pp.371-386.

ANALYSIS AND SIMULATION OF THE EXPERIMENTAL SYSTEM OF A 6-RSS PARALLEL MANIPULATOR

Rogério Sales Gonçalves

School of Mechanical Engineering
Federal University of Uberlândia
Campus Santa Mônica, 38400-902 Uberlândia / MG, Brazil
rsgoncalves@mecanica.ufu.br

João Carlos Mendes Carvalho

jcmendes@mecanica.ufu.br

Abstract: *This paper presents the architecture of parallel structure 6-RSS and the study of the number of degrees of freedom of this structure. Graphical simulations had allowed to confirm the results gotten for the mathematical model. From the graphical simulations it was possible to define the parameters of construction of the prototype. In this paper also the constructed prototype is described. Finally the results of the analysis of the limits of movement of the structure are presented and a section of the workspace.*

Keywords: *Robotics, Parallel Structures, Graphical Simulation, 6-RSS Mechanism.*