

PLANO DE PESQUISA PARA TESE DE DOUTORADO: INFLUÊNCIA DOS EFEITOS DE FLEXIBILIDADE E FOLGA NAS JUNTAS ARTICULADAS DE MANIPULADORES PARALELOS - PROJETO GMT/ FAPESP

Supervisor: Prof. Dr. João Evangelista Steiner

1 Introdução

Mecanismos de cinemática paralela vêm sendo cada vez mais utilizados em diversas áreas, ainda que não sejam conhecidos por esse nome. Provavelmente, o mecanismo paralelo mais conhecido seja a estrutura hexápode de 6 graus de liberdade (6dof), também denominada Plataforma de Stewart-Gough. Basicamente, consiste de uma plataforma móvel que se encontra unida a uma base fixa por meio de 6 cadeias cinemáticas, cada uma delas composta por 2 elos e 3 juntas articuladas: universal, prismática e esférica. Em cada cadeia, o sistema de atuação é acoplado à junta P prismática sendo, portanto, ativa. Dentre as aplicações, destacam-se o seu uso como simulador de voo [1, 2] e robô cirurgião [3, 4] (Fig. 1).



(a)



(b)

Figura 1. Mecanismo paralelo aplicado como: (a) Simulador de voo; (b) Robô cirúrgico

Por apresentar uma estrutura modular e executar qualquer deslocamento no espaço tridimensional, acreditava-se que seria o mecanismo de uma máquina universal, adequada a inúmeras aplicações. Apesar das suas aparentes vantagens, a estrutura hexápode apresenta sérias limitações. É

volumosa, ocupando uma grande região no local de instalação, em contraste com o pequeno espaço de trabalho que oferece ao seu efetuador. O seu controle é complexo, ou seja, uma simples trajetória retilínea para a plataforma torna necessária a ação simultânea dos atuadores das 6 cadeias. Além disso, a sua estrutura mecânica caracteriza-se pelo emprego de um grande número de componentes e de um sistema de atuação bastante intrincado, formado por motor elétrico, fuso, castanha e guia telescópica.



Figura 2 – (a) Robô Delta; (b) Olho Ágil

Como alternativa à estrutura hexápode, passou-se a investigar estruturas cinemáticas com $gd\ell$ inferior a 6. O robô Delta, proposto por Clavel [5] (Fig. 2-a), para operações de manipulação, tornou-se um paradigma de sucesso nas indústrias alimentícia e farmacêutica. Com 4 $gd\ell$, sendo 3 de translação e um de rotação, destaca-se pelo seu alto desempenho, capaz de impor à garra uma aceleração de 100 m/s^2 , alcançando velocidades próximas a 10 m/s , em virtude da localização dos atuadores na base. Outro que merece destaque, apesar de não ser explorado comercialmente, é o “olho ágil” [6], um robô de 3 $gd\ell$, que opera no espaço esférico e é responsável pela orientação de uma câmera (Fig. 2-b).

Paralelamente ao desenvolvimento destes robôs paralelos, houve a busca por uma abordagem sistemática visando o projeto destas estruturas mecânicas. Desta maneira, foram formalizados alguns métodos para a Síntese do Tipo de mecanismos paralelos. O método da enumeração de cadeias ativas [7] tem como ponto de partida a definição do espaço de movimentação e o $gd\ell$ pretendido. Com isso, obtém-se a conectividade das cadeias, o que permite gerar um conjunto de arquiteturas candidatas. No entanto, a sua deficiência reside no fato de não garantir que os deslocamentos do efetuador sejam aqueles almejados, uma vez que são dependentes das orientações dos eixos das juntas. Conseqüentemente, pode haver ambigüidade nos deslocamentos independentes associados aos $gd\ell$. Este é o caso do mecanismo $3 \underline{R}UU$ [8, 9], que pode tanto executar 3 translações ou 3 rotações, dependendo das orientações escolhidas para os eixos das juntas U . Para resolver esta

pendência foram propostos os métodos de adição de cadeia passiva [10] e o alternativo [11].

Para a realização da Síntese Topológica, foram propostos métodos ainda mais sofisticados. Hervé [12] recomendou o emprego da Teoria dos Grupos de Deslocamento de Lie, em que os deslocamentos realizados pelo efetuador são o resultado da intersecção dos grupos de deslocamento associados às cadeias cinemáticas que o conectam à base fixa. Outros trabalhos também exploraram este método [13-16].

O método da cadeia virtual [17], por sua vez, utiliza uma abordagem baseada na Teoria das Helicóides [18,19], sendo semelhante ao método baseado na teoria de grupos, mas preferindo as velocidades aos deslocamentos. Dentre os mecanismos gerados, podem ser mencionados o “tripteron” e o “quadrupteron”[20]. Ainda merece destaque o método proposto por Gogu [21], baseado na Teoria das Transformações Lineares [22] e na Morfologia Evolutiva. Em seu livro, apresenta um número impressionante de estruturas geradas a partir deste método.

Diante da enorme variedade de mecanismos paralelos com potencial de aplicação, que podem ser gerados a partir dos métodos de síntese citados nos parágrafos anteriores, selecionar a estrutura mais promissora dentre as possíveis, e determinar os parâmetros ótimos para a execução de tarefas, passaram a ser os temas mais relevantes para a investigação [23].

Com relação à questão da seleção da estrutura mais promissora, poucos trabalhos têm sido propostos [24, 25]. Hess-Coelho [25] propôs um método baseado no emprego de critérios relevantes que, uma vez ponderados, permitem a obtenção de um índice de mérito, de modo a classificar possíveis estruturas candidatas. Dentre os critérios considerados, podem ser mencionados a complexidade estrutural, os tipos de juntas articuladas empregadas e a presença de redundância. Deve-se ressaltar que tal método foi utilizado tanto na seleção de estruturas adequadas para punhos robóticos como para o projeto de suspensões veiculares [25, 26].

Além da síntese do tipo, outro tópico importante para o projeto é a síntese paramétrica, que pode ser definida como o processo de busca dos parâmetros do mecanismo, sejam estes cinemáticos ou dinâmicos, segundo determinado(s) critério(s). Dentre os métodos propostos, destacam-se o mapeamento de propriedades [27], a análise de sensibilidade [28] e a otimização [29-31].

O mapeamento de propriedades refere-se à representação gráfica, plana ou tridimensional, da distribuição de algumas propriedades, dentro do espaço de trabalho, tais como rigidez e frequência natural, úteis para etapas posteriores do desenvolvimento do sistema. Nesse sentido, os componentes do mecanismo podem ser modelados como corpos rígidos ou flexíveis, empregando-se métodos como o de elementos finitos e o de parâmetros concentrados. Sobre esse mapeamento pode ser feita uma análise sobre a susceptibilidade do mecanismo a variações desses parâmetros.

A análise de sensibilidade avalia o quão um sistema é sensível à variação de alguns parâmetros, em relação a um determinado critério considerado relevante. A otimização, por sua vez,

constitui-se no emprego de técnicas numéricas associadas à busca de parâmetros considerados ótimos, uma vez que maximizam ou minimizam uma função associada ao desempenho do mecanismo. Essa função poderá representar matematicamente, por exemplo, o tamanho do espaço de trabalho ou, eventualmente, o grau de anisotropia de uma propriedade.

Mesmo com a obtenção da estrutura cinemática adequada a uma tarefa e de seus parâmetros correspondentes, não podem ser ignoradas questões relevantes associadas, em sua maioria, à própria operação. Nesse sentido, destacam-se as configurações singulares [32-34], tanto internas como de fronteira, os erros de posicionamento do efetuador associados ao controle dos atuadores, além da influência das folgas ou erros dimensionais nas juntas [35].

Como pode ser constatado pelos exemplos apresentados, verifica-se o predomínio das aplicações dos mecanismos paralelos em operações de manipulação e usinagem. No LaMMaR, Laboratório de Mecanismos, Máquinas e Robôs, objetivando estudar melhor esse tipo de mecanismo, encontra-se o robô Laila e, a seguir, serão descritos seus subsistemas.

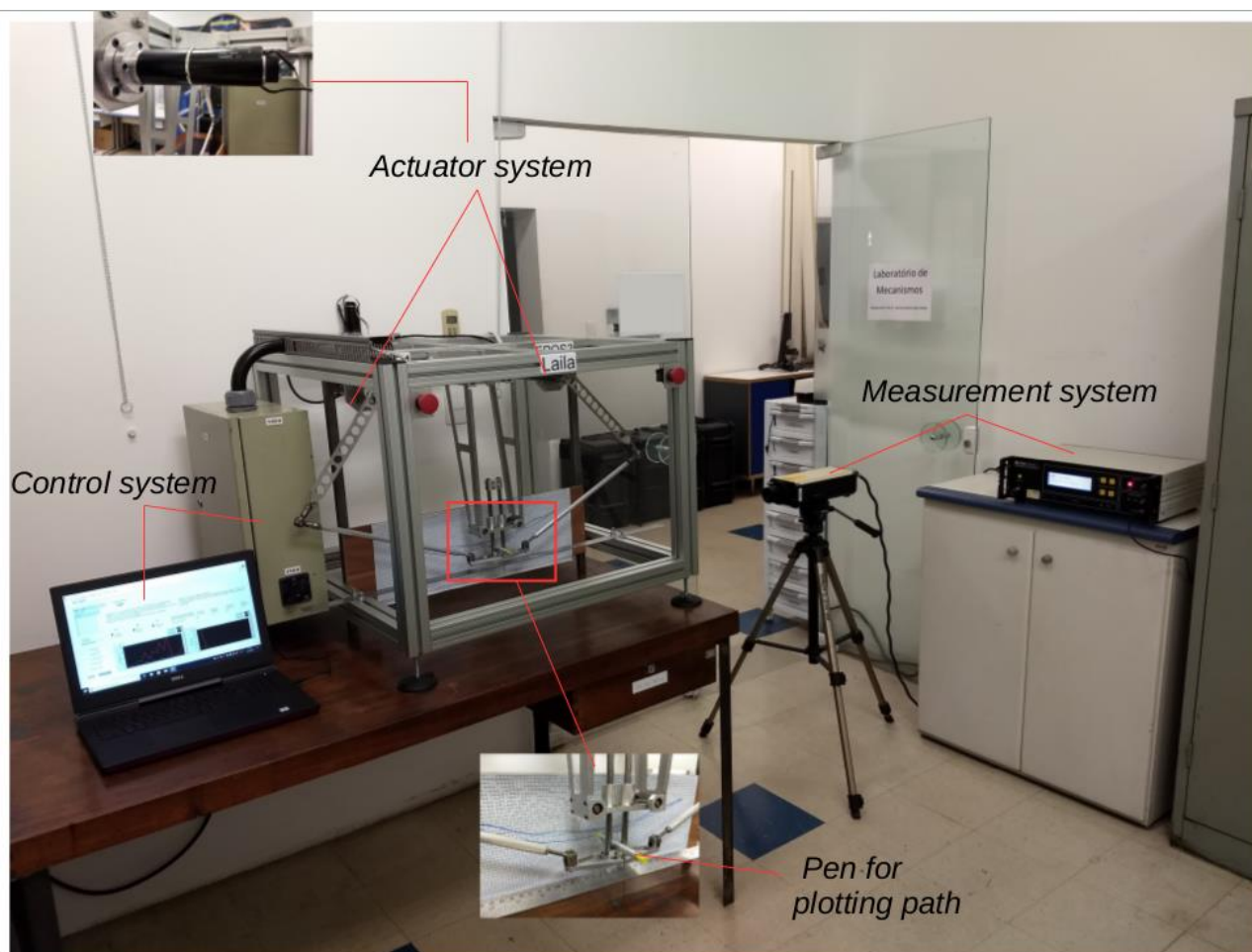


Figura 3 – Robô Laila e seus subsistemas.

O sistema mecânico corresponde a um mecanismo paralelo de 3 gdl (Fig.3), cujo efetuador conecta-se à base fixa por meio de três cadeias cinemáticas ativas, duas delas são idênticas, do tipo

RSU, enquanto que a terceira é P(Pa)P. As letras R, P, S, U, Pa são parte de uma notação literal que significa revolução, prismática, esférica, universal e paralelogramo, sendo que as letras sublinhadas correspondem às juntas ativas. Construtivamente, as juntas esférica e universal foram concebidas como conjuntos de três ou duas juntas de revolução, ao invés de se empregar as convencionais, de modo a aumentar o espaço de trabalho. Para os elos móveis, uma liga de alumínio é utilizada e a massa total do robô, incluindo a base fixa é de 54 kg.

O sistema de atuação possui 3 motores elétricos DC, Maxon RE40 No.148867, de 150W cada um, cujo eixo de saída se acopla a redutores planetários de 3 estágios, Maxon GP 42 C No.203120, de razão de transmissão 43:1. Desta maneira, cada atuador fornece até 22 Nm de torque máximo intermitente. Para as juntas prismáticas serem ativas, três polias dentadas e uma corrente sincronizadora são utilizadas como transmissão mecânica. Em relação ao sistema de controle, há 3 acionamentos Maxon EPOS2 70/10, 3 encoders MR Type L 256–1024 CPT com resolução de 4000 quad-counts por volta, todos conectados por uma rede CAN a um computador com processador de 64 bits, 1.83GHz, e com 4GB RAM. Além disso, o computador roda o software LabVIEW, da National Instruments, de modo a implementar diferentes estratégias de controle, adquirir e enviar os sinais de controle a 1kHz (clock rate) e a 50 Hz (frequência de amostragem). Por fim, são também empregadas 3 fontes de potência MeanWell, modelo NES-350-27.

2 Objetivos

Objetivo Geral:

Fornecer contribuições para a metodologia de síntese de manipuladores paralelos, no que diz respeito às juntas articuladas empregadas em sua estrutura mecânica.

Objetivos específicos:

- a) Avaliar a influência da flexibilidade das juntas passivas, bem como do seu campo de folgas, sobre o comportamento dinâmico de cada cadeia cinemática e sobre o mecanismo do robô Laila como um todo.
- b) Propor modificações construtivas nas juntas articuladas de tal maneira que, além de não reduzir o espaço de trabalho do robô Laila, proporcionem tanto o aumento da rigidez como a redução das folgas presentes, aprimorando o comportamento mecânico, tendo em vista aplicações de manipulação.
- c) Fornecer recomendações gerais que possam ser utilizadas na síntese topológica e paramétrica de manipuladores paralelos.

Referências

- [1] Dongsu W, Hongbin G (2007) Adaptive sliding control of 6-dof flight simulator motion platform. *Chinese Journal of Aeronautics* 20:425-433
- [2] Merlet J-P (2006) *Parallel robots*. Springer, Netherlands
- [3] Meng W, Liu Q, Zhou Z, Ai Q, Sheng B, Xie S (2015) Recent development of mechanisms and control strategies for robot-assisted lower limb rehabilitation. *Mechatronics*.31:132-145
- [4] Pilsa D, Gherman B, Vaida C, Suciú M, Plitea N (2013) An active hybrid parallel robot for minimally invasive surgery. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 29(4):203-221
- [5] Clavel, R. (1991) *Conception d'un robot parallèle rapide à 4 degrés de liberté*. Ph.D. Thesis, EPFL, Lausanne, Switzerland
- [6] Gosselin CM, Hamel JF (1994) The agile eye: a high-performance three-degree-of-freedom camera-orienting device. *Proceedings of the 1994 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, San Diego 1:781-786. doi: 10.1109/ROBOT.1994.351393
- [7] Tsai L-W (2001) *Mechanism Design: Enumeration of Kinematic Structures According to Function*. CRC Press, Washington
- [8] Tsai LW (1999) *Robot analysis: the mechanics of serial and parallel manipulators*. John Wiley & Sons, New York
- [9] Di Gregori R (2001) A new parallel wrist using only revolute pairs: the 3-RUU wrist. *Robotica* 19(3):305-309
- [10] Chin-Hsing K, Jian SD (2013) Task-oriented structure synthesis of a class of parallel manipulators using motion constraint generator. *Mech Mach Theory* 70:394:416. <http://dx.doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2013.08.010>
- [11] Hess-Coelho T A (2007) An alternative procedure for type synthesis of parallel mechanisms. In: 12th IFTOMM World Congress. Besancon, Franca.
- [12] Hervé JM The Lie group of rigid body displacements, a fundamental tool for mechanism design. *Mech Mach Theory* 34(5):719-730
- [13] Qiang Z, Yuefa F (2012) Structural synthesis and analysis of serial-parallel hybrid mechanisms with spatial multi-loop kinematic chains. *Mech Mach Theory* 49:198-215. doi:10.1016/j.mechmachtheory.2011.10.008
- [14] Song Y, Qi Y, Dong G, Sun T (2016) Type synthesis of 2-DoF rotational parallel mechanisms actuating the inter-satellite link antenna. *Chinese Journal of Aeronautics* 29(6):1795-1805. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cja.2016.05.005>
- [15] Xianwen K, Clément MG (2006) Type synthesis of 4-DOF SP-equivalent parallel manipulators: A virtual chain approach. *Mech Mach Theory* 41:1306-1319. doi:10.1016/j.mechmachtheory.2006.01.004
- [16] Simoni R, Carboni AP, Martins D (2009) Enumeration of parallel manipulators. *Robotica*. 27(4):589-597. <https://doi.org/10.1017/S0263574708004979>
- [17] Rasim A, Çagdas B (2004) Structural synthesis of parallel manipulators. *Mech Mach Theory* 39:857-870. doi:10.1016/j.mechmachtheory.2004.02.008
- [18] Shuofei Y, Tao S, Tian H, Qinchuan L, Dongbing G (2016) A finite screw approach to type synthesis of three-DOF translational parallel mechanisms. *Mech Mach Theory* 104:405-419. <http://dx.doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2016.02.018>
- [19] Yundou X, Dongsheng Z, Jiantao Y, Yongsheng Z (2017) Type synthesis of the 2R1T parallel mechanism with two continuous rotational axes and study on the principle of its motion decoupling *Mech Mach Theory* 108:27-40. <http://dx.doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2016.09.007>
- [20] Clément M. Gosselin. Compact dynamic models for the tripteron and quadruperon parallel manipulators. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I, Journal of Systems and Control Engineering* 223(11):1-11, 2009.
- [21] Gogu G (2004) Structural synthesis of fully-isotropic translational parallel robots via theory of linear transformations. *Eur J Mech A Solids* 23:1031-1039. doi:10.1016/j.euromechsol.2004.08.006
- [22] Benyamin M, Hassan Z, Saeed S (2010) Structural synthesis of 5 DoFs 3T2R parallel manipulators with prismatic actuators on the base. *Robotics and Autonomous Systems* 58:307321. doi:10.1016/j.robot.2009.10.001
- [23] Xiangdun M, Feng G, Shengfu W, Qiaode J G (2014) Type synthesis of parallel robotic mechanisms: Framework and brief review *Mech Mach Theory* 78:177-186. <http://dx.doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2014.03.008>
- [24] Huiping S, Tingli Y, Lv-zhong M (2005) Synthesis and structure analysis of kinematic structures of 6-dof parallel robotic mechanisms. *Mech Mach Theory* 40:1164-1180.

doi:10.1016/j.mechmachtheory.2004.12.020

- [25] Hess-Coelho TA (2006) Topological Synthesis of a Parallel Wrist Mechanism. Transactions of the ASME, J of Mech Des 128(1):230-235
- [26] Malvezzi F, Hess-Coelho TA (2014) Topological synthesis of a novel parallel mechanism for vehicle rear suspensions. New Advances in Mechanism, Transmissions and Applications, Mechanism and Machine Science 17, Springer. doi: 10.1007/978-94-007-7484-8_5
- [27] Long W, Guofeng W, Haitao L, Tian H (2018) An approach for elastodynamic modeling of hybrid robots based on substructure synthesis technique. Mech Mach Theory 123:124-136.
<https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2017.12.019>
- [28] Zi B, Ding H, Wu X, Kecskeméthy A (2014) Error modelling and sensitivity analysis of a hybrid-driven based cable parallel manipulator. Precis Eng 38(1):197-211.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.precisioneng.2013.06.002>
- [29] Arkadeep NC, Ashitava G (2017) Optimum design of multi-degree-of-freedom closed-loop mechanisms and parallel manipulators for a prescribed workspace using Monte Carlo method. Mech Mach Theory 118:115-138. <http://dx.doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2017.07.021>
- [30] Hao W, Weidong Y, Genliang C (2017) An approach of topology optimization of multi-rigid-body mechanism. Comput Aided Des 84:39-55. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cad.2016.12.002>
- [31] Venter GA, Beck T, Silva MM (2016) A simple hierarchical procedure for parameter identification in robust topology optimization. J Braz Soc Mech Sci Eng 38(2):679-698.
<https://doi.org/10.1007/s40430-014-0271-7>
- [32] Balchanowski J (2014) Topology and analysis of the singularities of a parallel mechanism with three degrees of freedom. Arch Civ Mech Eng 14(1):80-87
- [33] Azulay H et al. (2014) Comparative analysis of a new 3_PPRS parallel kinematic mechanism. Rob Comput-Integr Manuf 30(4):369-378
- [34] Malvezzi F, Coelho TAH (2015) Singularity and Workspace Analyses of a 3-DOF Parallel Mechanism for Vehicle Suspensions. In Corves B, Lovasz EC, Hüsing M (eds) Mechanisms Transmissions and Applications. Mechanism and Machine Science, vol 31. Springer, Cham, pp 311-319.
http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-17067-1_32
- [35] Kong L, Chen G, Zhang Z, Wang H (2018) Kinematic calibration and investigation of the influence of universal joint errors on accuracy improvement for a 3-DOF parallel manipulator. Robot Comput Integr Manuf 49:388–397. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rcim.2017.08.002>
- [36] Meirovitch, L. (2010) Fundamentals of Vibrations, Waveland Pr Inc.
- [37] ORSINO, RENATO MAIA MATARAZZO. Recursive modular modelling methodology for lumped-parameter dynamic systems. PROCEEDINGS OF THE ROYAL SOCIETY A-MATHEMATICAL PHYSICAL AND ENGINEERING SCIENCES, v. 473, p. 20160891, 2017.
- [38] Silva, R.M.C.; Coelho, T.A.H. (2019) Analysis of a parallel manipulator for determination of promising kinematic and dynamic parameters. Proceedings of the XVIII International Symposium on Dynamic Problems of Mechanics, M.A. Savi, T.G. Ritto and W.M. Bessa (Editors), ABCM, Buzios, RJ, Brazil, March 10 th to 15 th , 2019