

ANDRÉ GARNIER COUTINHO

# Simulação dinâmica e validação experimental de técnicas de controle para robôs de arquitetura paralela

Plano de pesquisa para o edital de bolsas  
de estudo do Programa de Pós Gradua-  
ção em Engenharia Mecânica (PPGEM)  
da Escola Politécnica da Universidade de  
São Paulo (EPUSP)

Área de concentração:  
Engenharia Mecânica

Orientador:  
Prof. Dr. Tarcísio A. Hess Coelho

São Paulo  
15 de Setembro de 2015

**Nome:** André Garnier Coutinho

**NUSP:** 6846085

**Curso:** Doutorado Direto

**Área de concentração:** Engenharia Mecânica de Projeto e Fabricação (3151)

**Orientador:** Professor Doutor Tarcísio Antônio Hess Coelho

**Ano de ingresso no PPGEM:** 2014

# 1 Introdução

Os mecanismos de arquitetura paralela são amplamente utilizadas em simuladores de voo, simuladores automobilísticos, e tarefas de *pick-and-place*. Além disso, também são utilizados em sistemas de posicionamento, sistemas de medição, máquinas de usinagem, entre outras tarefas.

Há uma série de vantagens em utilizar mecanismos paralelos no lugar dos tradicionais mecanismos seriais. Dentre elas podemos citar sua grande capacidade de carga, alta precisão de posicionamento, alta rigidez estrutural, e uma redução significativa na inércia [6, 10, 11, 18]. Outra característica marcante desse tipo de arquitetura são as altas velocidades e acelerações atingidas, as quais superam muito os valores máximos atingidos utilizando arquitetura serial. Grande parte dessas vantagens se devem à possibilidade de ter todos os motores localizados na base. Como desvantagens podemos citar o menor espaço de trabalho e modelo dinâmico muito mais complexo e difícil de se obter [6, 1].



Figura 1: Robô industrial Adept Quattro

Devido à difícil obtenção e alta complexidade do modelo dinâmico, o controle de mecanismos de arquitetura paralela é uma tarefa desafiadora. A utilização de modelos dinâmicos simplificados limita o desempenho do projeto de controladores baseados no modelo. Porém, mesmo tendo conseguido obter o modelo dinâmico completo, técnicas de controle não linear tradicionais que realizam compensação das não linearidades do sistema [4, 13] podem gerar leis de controle com custo computacional muito elevado. Esse paradigma contribui com a falta de estratégias de controle apropriadas para esse tipo de mecanismos, e consequentemente uma exploração não satisfatória dos potenciais promissores de tais máquinas, como resposta dinâmica rápida e alta precisão [20].

Atualmente novas metodologias para modelagem de dinâmica multicorpos que se mostram muito mais adequadas para aplicações em qualquer tipo de mecanismo estão sendo desenvolvidas [5, 18, 19], das quais se destaca o trabalho realizado por Renato Orsino, doutorando também orientado pelo professor Dr. Tarcísio Coelho [3, 7, 24, 25, 26].

Outro assunto relevante ainda pouco estudado por pesquisadores é o controle voltado a mecanismos paralelos [6]. Como já foi dito anteriormente, devido a grande dificuldade de modelagem de sistemas complexos utilizando os métodos tradicionais, ainda são poucos

os estudos de implementação de técnicas de controle em mecanismos de cadeia fechada. Sendo assim, é possível aliar as novas metodologias de modelagem desenvolvidas à implementação, adaptação e aprimoramentos de algoritmos de controle não-linear voltados a mecanismos paralelos [4].

## 2 Objetivos

Os principais objetivos do projeto são:

- Desenvolvimento de um algoritmo para dedução das equações diferenciais de movimento de mecanismos de arquiteturas serial e paralela com vínculos de natureza holônoma (baseado na utilização dos parâmetros de Denavit-Hartenberg [4, 16, 17] e no método Orsino de acoplamento de subsistemas [26]) que possua as seguintes características:
  - Considere todos os efeitos da dinâmica de corpos rígidos, inclusive atritos nas juntas.
  - Aplicação simples, mesmo para sistemas de alta complexidade.
  - Alto grau de automatização, de modo que possa ser facilmente implementado em softwares de manipulação simbólica.
- Elaboração de uma metodologia de projeto de controle não linear robusto, baseado na técnica de controle por modos deslizantes [13, 14], para mecanismos de arquitetura paralela, tradicionais e com atuação redundante [18], com incertezas paramétricas.
- Realizar a modelagem cinemática e dinâmica do mecanismo  $2R_{SU}+PPaP$  [12], utilizando o algoritmo de modelagem desenvolvido.
- Realizar o projeto de um controlador de trajetória para o mecanismo escolhido, utilizando a metodologia de projeto de controle proposta.
- Realizar simulações dinâmicas das leis de controle sintetizadas.
- Realizar a validação experimental do controlador projetado no protótipo do mecanismo escolhido, que se encontra no laboratório de mecanismos.

### 3 Metodologia do projeto

O estágio atual de desenvolvimento do presente projeto ocorre basicamente em três áreas: a realização da modelagem e simulação cinemática e dinâmica do mecanismo  $2\text{RSU} + \text{PPaP}$  [12], o projeto de um controlador não linear multivariável robusto baseado no modelo dinâmico, e a validação experimental das leis de controle sintetizadas.

Os trabalhos no âmbito de modelagem e simulação estão sendo desenvolvidos a partir da aplicação do algoritmo genérico de modelagem cinemática e dinâmica de mecanismos paralelos desenvolvido, baseado na utilização dos parâmetros de Denavit-Hartenberg [4, 16, 17] e no método Orsino de acoplamento de subsistemas [26]. Toda modelagem será feita em Python, utilizando uma biblioteca de manipulação simbólica (SymPy). As simulações da dinâmica direta do mecanismo serão feitas utilizando métodos implícitos de solução de sistemas de EDOs, de modo a garantir estabilidade numérica do método, mesmo utilizando leis de controle descontínuas.

Os trabalhos na área de projeto de controle serão feitos utilizando a metodologia desenvolvida de projeto de controladores robustos multivariáveis para mecanismos paralelos, baseada no modelo dinâmico do mecanismo a ser controlado e na técnica de controle por modos deslizantes [13, 14].

Os trabalhos no âmbito da validação experimental das leis de controle sintetizadas serão realizados no protótipo do mecanismo  $2\text{RSU} + \text{PPaP}$  que encontra-se no laboratório de mecanismos. A bancada experimental já está funcional e já estão sendo realizados ensaios de leis de controle de trajetória baseadas apenas no modelo cinemático do mecanismo. Para realização da validação experimental, será realizada a identificação dos parâmetros do sistema e suas respectivas incertezas, projeto do controlador baseado nos parâmetros e incertezas identificadas, e implementação das leis de controle e aquisição de dados em ambiente Labview.

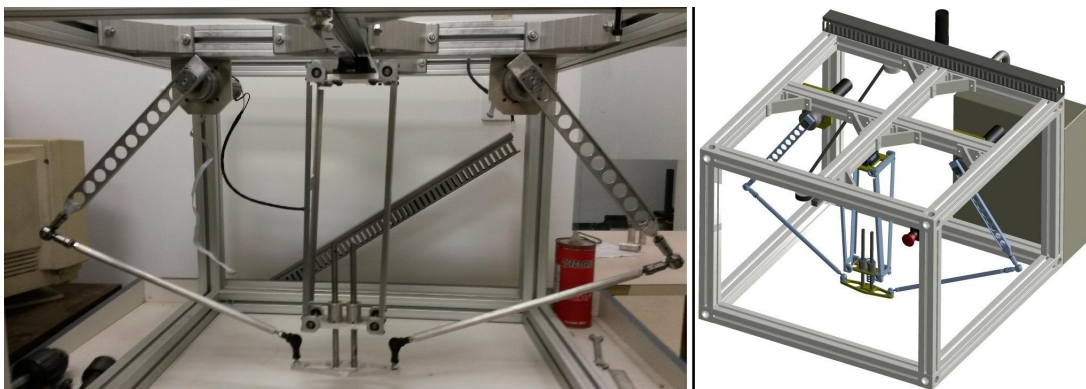


Figura 2: Mecanismo  $2\text{RSU} + \text{PPaP}$

## 4 Publicações

A partir dos resultados obtidos no trabalho de formatura realizado na graduação, foi escrito um artigo denominado “Development of a controller for a 3-DOF robotic platform for user interaction in rehabilitation therapies” [15], o qual foi escrito pelo aluno em coautoria com Eng. Guilherme Martinho Dobrianskyj e seu orientador, Prof. Dr. Tarcísio Antônio Hess Coelho. Foi aceito e apresentado no BioRob 2014 (IEEE International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics) na seção de posters, no dia 15 de agosto de 2014. O artigo pode ser acessado por <http://dx.doi.org/10.1109/BIOROB.2014.6913880>.

Um capítulo do livro *Dynamic balancing of mechanisms and synthesizing of parallel robots* (editado pelo Prof. Dr. Dan Zhang da Universidade do Instituto de Tecnologia de Ontario e a ser publicado pela editora Springer), denominado “Dynamic modelling and control of balanced parallel mechanisms” [25] foi escrito em coautoria com o aluno de doutorado direto Renato M. M. Orsino e com o Prof. Dr. Tarcísio Antonio Hess Coelho. Este capítulo de livro trata do uso de uma metodologia de modelagem modular para o balanceamento adaptativo e desenvolvimento de algoritmos de controle para mecanismos robóticos paralelos. A revisão pelos editores e autores já foi realizada e em breve será feita a publicação.

Um artigo submetido para o *Special Issue on: “Dynamic Balancing of Mechanisms and Parallel Robots”* do periódico *International Journal of Mechanisms and Robotic Systems*, denominado “A new approach for obtaining the dynamic balancing conditions in serial mechanisms” [27], o qual foi escrito em coautoria com o Prof. Dr. Tarcísio Antonio Hess Coelho. O artigo já foi aceito e está em fase de revisão gramatical e ortográfica, realizada pelos autores.

## 5 Disciplinas de pós-graduação

Ao longo do programa o aluno já cumpriu 48 créditos, tendo cursado 6 disciplinas de pós-graduação:

- PME-5004 — Complementos de Matemática I
- PMR-5010 — Elementos Finitos em Sistemas Multifísicos: Fundamentos
- PMR-5215 — Otimização Aplicada ao Projeto de Sistemas Mecânicos
- PMR-5238 — Análise e Síntese de Mecanismo Planos e Tridimensionais
- PMR-5211 — Mecânica dos Sólidos Experimental
- PMR-5234 — Técnicas de Ultra-Som e suas aplicações na Indústria e na Medicina

Ressalta-se que em todas o aluno obteve conceito A, demonstrando bom aproveitamento.

Além disso, foi cursada como ouvinte a seguinte disciplina:

- PMR-5014 — Controle Não Linear Aplicado a Sistemas Mecânicos e Mecatrônicos
- na qual também foi obtido conceito A.



## 6 Cronograma de Atividades do Projeto

Serão realizados as seguintes etapas para a realização da proposta:

- (1) Modelagem cinemática do mecanismo  $2\text{RSU} + \text{PPaP}$
- (2) Modelagem dinâmica do mecanismo
- (3) Simulação dinâmica inversa do mecanismo
- (4) Simulação dinâmica direta do mecanismo utilizando leis de Controle por Torque Computado
- (5) Identificação dos parâmetros do sistema e suas respectivas incertezas, utilizando o protótipo
- (6) Projeto de controlador por modos deslizantes
- (7) Simulação do sistema em malha fechada, utilizando o controlador projetado
- (8) Preparo para o exame de qualificação
- (9) Validação experimental do controlador projetado, utilizando o protótipo
- (10) Escrever artigo sobre uma nova abordagem para modelagem dinâmica de mecanismos seriais, utilizando o método Orsino de acoplamento de subsistemas, aliado aos parâmetros de Denavit-Hartenberg [4, 16, 17]
- (11) Escrever artigo sobre modelagem dinâmica de mecanismos paralelos, utilizando o método Orsino de acoplamento de subsistemas
- (12) Escrever artigo sobre controle não linear robusto aplicado a mecanismos paralelos
- (13) Avaliação geral dos resultados
- (14) Preparo da tese

Aqui segue um cronograma estimado para realização das atividades propostas:

Tabela 1: Cronograma – Planejamento de Atividades por quadrimestre

Ativ./Quad.	3º/15	1º/16	2º/16	3º/16	1º/17	2º/17	3º/17
(1)	████						
(2)	████						
(3)	████						
(4)		████					
(5)		████	████				
(6)		████	████				
(7)		████	████				
(8)	████	████	████				
(9)				████	████	████	
(10)	████	████					
(11)				████			
(12)							████
(13)							████
(14)					████	████	████

## Referências

- [1] R. Z. H. de Almeida. Modelagem dinâmica e controle e robô manipulador de arquitetura paralela assimétrica de três graus de liberdade. *Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos*, 2013.
- [2] G. M. Dobriankyj and A. G. Coutinho. Plataforma robótica para reabilitação do membro superior humano. *Tese (Trabalho de Conclusão de Curso) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos*, 2013.
- [3] R. M. M. Orsino and T. A. H. Coelho. Metodologia para Análise e Síntese de Mecanismos. *Material de apoio para as disciplinas PMR2430 e PMR2331 - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo*, 2013.
- [4] J. J. Craig. *Introduction to robotics: mechanics and control*. Addison-Wesley series in electrical and computer engineering: control engineering. Pearson/Prentice Hall, 2005.
- [5] E. Jarzebowska. Quasi-coordinates based dynamics modeling and control design for nonholonomic systems. *Nonlinear Analysis: Theory, Methods and Applications*, 71(12):118 – 131, 2009.

- [6] J-P. Merlet. Still a long way to go on the road for parallel mechanisms. In *ASME DETC Conference, Montreal, 2002*, 2002.
- [7] R. M. M. Orsino and T. A. H. Coelho. A contribution for developing more efficient dynamic modelling algorithms of parallel robots. *International Journal of Mechanisms and Robotic Systems*, 1(1):15 – 34, 2013.
- [8] A. Zubizarreta, I. Cabanes, M. Marcos, C. Pinto, E. Portillo. Extended CTC control for parallel robots. *Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA), 2010 IEEE Conference on*, 2010.
- [9] A.M. Bloch, M. Reyhanoglu, N.H. McClamroch. Control and stabilization of nonholonomic dynamic systems. *Automatic Control, IEEE Transactions on*, 1992.
- [10] W. Khalil and E. Dombre. *Modeling, Identification and Control of Robots*. Taylor & Francis, 2002.
- [11] L. W. Tsai. *Robot Analysis: The Mechanics of Serial and Parallel Manipulators*. John Wiley & Sons, 1999.
- [12] V. D. Kumazawa, T. A. Hess Coelho, D. Rinaudi, G. Carbone, M. Ceccarelli. Kinematic analysis and operation feasibility of a 3-dof asymmetric parallel mechanism. In *20th COBEM, Gramado, Brazil*, 2009.
- [13] J-J. E. Slotine and W. Li. *Applied nonlinear control*. Prentice Hall, 1991.
- [14] V. Utkin, J. Guldner, J. Shi. *Sliding mode control in electro-mechanical systems*. Vol. 34. CRC press, 2009.
- [15] G. M. Dobrianskyj, A. G. Coutinho, T. A. H. Coelho. Development of a controller for a 3-DOF robotic platform for user interaction in rehabilitation therapies. *Biomedical Robotics and Biomechatronics 2014 5th IEEE RAS EMBS International Conference on*, 819 – 825, 2014.
- [16] J. Denavit and R. S. Hartenberg. A Kinematic Notation for Lower-Pair Mechanisms Based on Matrices. *Journal of Applied Mechanics*, 215–221, June 1955.
- [17] H. Lipkin. A note on denavit-hartenberg notation in robotics. *ASME 2005 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*, 921–926, 2005.
- [18] H. Cheng, Y-K. Yiu, Z. Li. Dynamics and control of redundantly actuated parallel manipulators *Mechatronics, IEEE/ASME Transactions on*, 8(4): 483–491, 2003.

- [19] O. Altuzarra, P. M. Eggers, F. J. Campa, C. Roldan-Paraponiaris, C. Pinto. Dynamic Modelling of Lower-Mobility Parallel Manipulators Using the Boltzmann-Hamel Equations *Mechanisms, Transmissions and Applications*, 31: 157–165, 2015.
- [20] H. Abdellatif, B. Heimann, J. Kotlarski, T. Ortmaier. Practical model-based and robust control of parallel manipulators using passivity and sliding mode theory *Robotics 2010: Current and Future Challenges*, InTech, 2010.
- [21] Y. Li and Q. Xu. Dynamic modeling and robust control of a 3-PRC translational parallel kinematic machine *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 25(3): 630–640, 2009.
- [22] O. Linda and M. Manic. Uncertainty-robust design of interval type-2 fuzzy logic controller for delta parallel robot *Industrial Informatics, IEEE Transactions on*, 7(4): 661–670, 2011.
- [23] S-L. Chen and Y-C. Tsai. Contouring control of a parallel mechanism based on equivalent errors *American Control Conference, 2008*, 2384–2388, 2008.
- [24] R. M. M. Orsino, T. A. H. Coelho, C. P. Pesce. Analytical mechanics approaches in the dynamic modelling of Delta mechanism *Robotica*, 33(4): 953–973, 2015.
- [25] R. M. M. Orsino, A. G. Coutinho, T. A. H. Coelho. Dynamic modelling and control of balanced parallel mechanisms *Dynamic Balancing of Mechanisms and Synthesizing of Parallel Robots*, Springer, 2016 (in press).
- [26] R. M. M. Orsino and T. A. H. Coelho (2015). A contribution on the modular modelling of multibody systems. Manuscript submitted for publication
- [27] A. G. Coutinho and T. A. H. Coelho (2015). A new approach for obtaining the dynamic balancing conditions in serial mechanisms. Manuscript submitted for publication