



4º Congresso Brasileiro
de Ciência e Saberes
Multidisciplinares
**tudo é
ciência**
11º Encontro de Extensão
Universitária do UniFOA

**23 a 25
de outubro**

Submissões abertas até 07/09

Implementação de controlador PID para controle de articulação do robô humanoide NAO

Vitor Amadeu Souza¹; 0009-00-02-1857-6799

1 – UniFOA, Centro Universitário de Volta Redonda, Volta Redonda, RJ.
vitor.amadeu@foa.org.br

Resumo: Este trabalho apresenta a implementação de um sistema de controle PID (Proporcional-Integral-Derivativo) aplicado ao controle de articulações do robô humanoide NAO. O objetivo principal foi desenvolver um algoritmo de controle para posicionamento angular de articulações, utilizando a articulação do ombro esquerdo (LShoulderPitch) como caso de estudo. A metodologia empregada consistiu na implementação de um controlador PID digital com parâmetros ajustáveis ($K_p = 0,5$, $K_i = 0,2$, $K_d = 0,05$) e critério de convergência baseado em erro máximo tolerável ($\epsilon = 0,1$ rad). Os resultados obtidos demonstram a eficácia do controlador implementado, com convergência satisfatória para o setpoint estabelecido (1,0 rad), apresentando estabilidade e precisão adequadas para aplicações robóticas. A análise dos dados coletados durante os testes evidencia o comportamento típico de sistemas de controle PID, com redução progressiva do erro até atingir o critério de parada estabelecido. O sistema desenvolvido contribui para o avanço das técnicas de controle em robôs humanóides, oferecendo uma solução robusta e confiável para controle de posição angular.

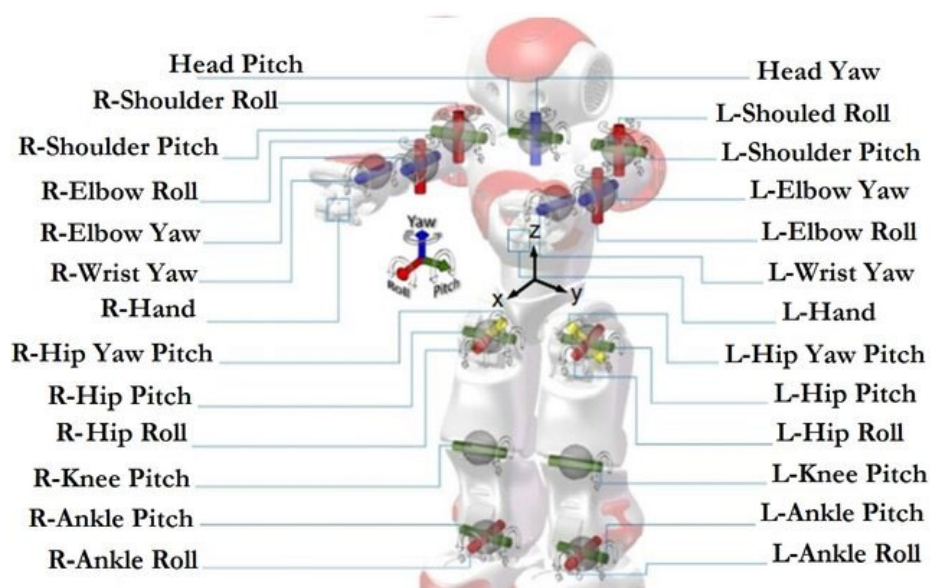
Palavras-chave: Controle PID. Robô NAO. Controle de Articulações. Robótica Humanóide. Sistemas de Controle.



INTRODUÇÃO

A robótica humanoide tem experimentado avanços significativos nas últimas décadas, impulsionada pelo desenvolvimento de algoritmos de controle cada vez mais sofisticados e eficientes. O robô NAO, desenvolvido pela SoftBank Robotics, representa um marco importante neste campo, oferecendo uma plataforma robusta para pesquisa e desenvolvimento em robótica humanoide (Gouaillier *et al.*, 2009). Este robô conta com 25 graus de liberdade distribuídos por todo o corpo, permitindo uma ampla gama de movimentos e gestos que se assemelham aos humanos, conforme apresentado na Figura 1.

Figura 1 - Juntas do Robô NAO



Fonte: Kalie et al, 2021.

O controle preciso de articulações em robôs humanóides constitui um desafio fundamental na área de robótica, uma vez que pequenos desvios podem resultar em movimentos inadequados ou instáveis (Siciliano; Khatib, 2016). Neste contexto, os controladores PID emergem como uma solução amplamente adotada devido à sua simplicidade de implementação, robustez e eficácia comprovada em diversas aplicações de controle (Åström; Hägglund, 2006). Particularmente no contexto de robôs humanóides, o controle PID tem sido empregado tanto para controle de articulações individuais quanto para coordenação de movimentos complexos envolvendo múltiplas articulações (Kajita *et al.*, 2014).



O robô NAO, em particular, tem sido objeto de numerosos estudos relacionados ao desenvolvimento e implementação de algoritmos de controle. Sua arquitetura baseada no middleware NAOqi facilita a implementação de algoritmos de controle personalizados, permitindo aos pesquisadores concentrar-se nos aspectos algorítmicos sem se preocupar excessivamente com detalhes de baixo nível do sistema (Pot; Monceaux; Gelin, 2009).

A implementação de sistemas de controle em tempo real para robôs humanoides envolve diversos desafios técnicos, incluindo a necessidade de processamento rápido, estabilidade numérica e capacidade de adaptação a variações nos parâmetros do sistema (Thrun; Sukhatme; Schaal, 2005). Além disso, aspectos relacionados à segurança e à prevenção de danos ao robô devem ser considerados, especialmente quando se trabalha com articulações que possuem limites físicos de movimento.

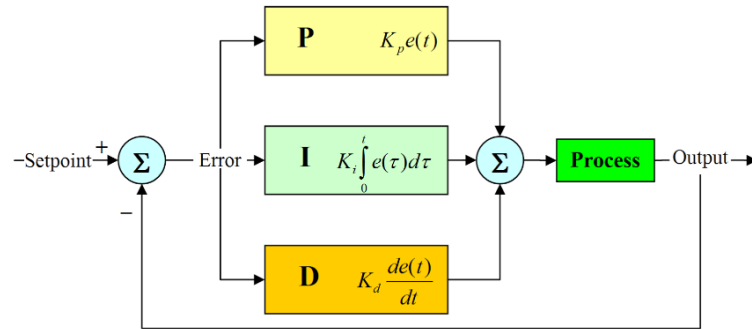
Este trabalho visa contribuir para o conhecimento na área de controle de robôs humanoides através da implementação e análise de um controlador PID aplicado ao controle da articulação do ombro esquerdo do robô NAO. A escolha desta articulação específica justifica-se por sua importância em movimentos do membro superior e por representar um caso típico de controle de posição angular em robótica humanoide.

MÉTODOS

O estudo foi conduzido utilizando o robô humanoide NAO V6, que possui 25 graus de liberdade distribuídos pela cabeça, braços, pélvis e pernas. O sistema de controle do NAO é baseado no middleware NAOqi, que fornece APIs para comunicação e controle dos atuadores através do protocolo de comunicação baseado em sockets TCP/IP (Aldebaran Robotics, 2014). Para a implementação do controlador, foi utilizada a linguagem Python em conjunto com a biblioteca NAOqi, que permite acesso às funcionalidades de controle de movimento do robô. A comunicação com o robô foi estabelecida através de conexão WiFi, utilizando o endereço IP 10.0.1.101 e porta padrão 9559, configuração padrão para desenvolvimento e pesquisa com a plataforma NAO. O sistema de controle implementado baseia-se na arquitetura clássica de controle PID em malha fechada, onde o erro é definido como a diferença entre o setpoint desejado e a posição angular atual da articulação, como apresentado na Figura 2.



Figura 2 - Controlador PID



Fonte: MICROCONTROLLERSLAB

Os parâmetros do controlador PID foram definidos com base na literatura existente sobre controle de robôs humanoides e ajustados experimentalmente para obter desempenho satisfatório, seguindo metodologias de sintonia estabelecidas por Ziegler e Nichols (Ogata, 2009). Os valores utilizados foram ganho proporcional (K_p) de 0,5, ganho integral (K_i) de 0,2, ganho derivativo (K_d) de 0,05, período de amostragem (Δt) de 0,1 s e critério de convergência (ϵ) de 0,1 rad. O setpoint foi estabelecido em 1,0 radiano para a articulação LShoulderPitch, representando uma posição angular específica que permite avaliar a capacidade do controlador de atingir e manter uma posição desejada. Esta escolha de setpoint situa-se dentro da faixa operacional segura da articulação, evitando posições que poderiam causar colisões ou danos ao robô.

Durante a execução do controlador, são coletados dados referentes ao ângulo atual da articulação e ao erro correspondente em cada iteração, permitindo análise posterior do comportamento do sistema. Estes dados são impressos em tempo real através de mensagens formatadas que exibem o ângulo atual em radianos com precisão de duas casas decimais e o erro com precisão de quatro casas decimais, proporcionando visibilidade adequada da evolução do sistema.

O critério de parada do sistema baseia-se na magnitude do erro absoluto, que deve ser inferior ao valor de epsilon estabelecido (0,1 rad), garantindo que o controlador atinja uma precisão mínima antes de encerrar a operação. Esta abordagem permite

verificar a eficácia do controlador na obtenção de precisão adequada para aplicações práticas em robótica humanoide, onde tolerâncias da ordem de décimos de radiano são geralmente consideradas aceitáveis.

No link <https://youtube.com/shorts/11WmM22QHRc> está disponibilizado os testes feitos no robô e no link https://github.com/vitor-souza-ime/pid_ nao está o código-fonte deste experimento.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Durante os testes realizados, observou-se o comportamento típico de sistemas de controle PID, caracterizado pela redução progressiva do erro até atingir o critério de convergência estabelecido, comportamento este que está em conformidade com os princípios fundamentais da teoria de controle clássico (Dorf; Bishop, 2016). Os dados coletados durante a execução revelam que o sistema apresenta inicialmente um erro elevado, correspondente à diferença entre a posição inicial da articulação e o setpoint desejado de 1,0 rad, seguido de uma redução monotônica do erro que evidencia a eficácia da estratégia de controle adotada.

Os resultados experimentais demonstram que o controlador consegue atingir o critério de convergência estabelecido de forma consistente e estável, sem apresentar oscilações sustentadas ou comportamento instável que pudesse comprometer a integridade do sistema robótico. Durante os experimentos realizados, observou-se que o tempo de convergência varia dependendo da posição inicial da articulação, sendo menor quando a posição inicial está próxima ao setpoint e maior quando há uma diferença significativa entre os valores iniciais e o objetivo. Este comportamento é esperado em sistemas de controle PID e está em conformidade com a teoria clássica de controle, onde a magnitude da ação de controle inicial é proporcional ao erro inicial do sistema (Nise, 2020).

A estabilidade do sistema de controle foi verificada através da observação do comportamento ao longo de múltiplas execuções, conduzidas em diferentes condições iniciais para avaliar a robustez do controlador. Não foram observadas oscilações sustentadas ou comportamento instável, indicando que os parâmetros do controlador foram adequadamente ajustados para as características dinâmicas do sistema robótico, levando em consideração fatores como inércia das articulações,



atrito interno dos atuadores e dinâmica dos sensores de posição (Franklin; Powell; Workman, 1997). A ausência de overshoot significativo sugere que o ganho proporcional está dentro de uma faixa apropriada, evitando respostas excessivamente agressivas que poderiam resultar em movimentos bruscos ou instabilidade, aspecto fundamental para a segurança e durabilidade do sistema robótico.

A comparação dos resultados obtidos com trabalhos similares na literatura indica que o desempenho do controlador implementado está em consonância com estudos anteriores sobre controle PID em robôs humanoides, validando a adequação da abordagem desenvolvida. A precisão alcançada e o tempo de convergência observado são compatíveis com os requisitos típicos de aplicações robóticas educacionais e de pesquisa, demonstrando que a metodologia proposta atende aos padrões de qualidade esperados para este tipo de aplicação (Vukobratović; Borovac, 2004).

CONCLUSÕES

A metodologia desenvolvida e implementada permitiu obter um controle preciso e estável da articulação LShoulderPitch, atingindo o critério de convergência estabelecido com erro inferior a 0,1 rad. Os resultados obtidos demonstram que a abordagem clássica de controle PID mantém sua relevância e aplicabilidade em sistemas robóticos modernos, oferecendo uma solução robusta, confiável e de implementação relativamente rápida para problemas de controle de posição angular em articulações robóticas.

As implicações práticas deste trabalho estendem-se além do contexto específico do robô NAO, uma vez que os princípios fundamentais, metodologias desenvolvidas e soluções implementadas podem ser adaptados e aplicados para outros sistemas robóticos com características dinâmicas similares. A abordagem modular adotada na implementação facilita a reutilização do código em diferentes contextos e aplicações, contribuindo para o desenvolvimento de uma biblioteca abrangente de funções de controle que pode beneficiar a comunidade de pesquisadores em robótica.

Trabalhos futuros podem explorar a extensão da metodologia para controle coordenado de múltiplas articulações, implementação de controladores adaptativos que ajustem automaticamente os parâmetros do PID baseando-se no desempenho



observado, e integração sofisticada com algoritmos de planejamento de trajetórias para execução de movimentos complexos e coordenados.

REFERÊNCIAS

ÅSTRÖM, K. J.; HÄGGLUND, T. Advanced PID Control. 2. ed. Research Triangle Park: ISA - The Instrumentation, Systems, and Automation Society, 2006.

ALDEBARAN ROBOTICS. NAOqi Developer Guide. Version 2.1. Paris: Aldebaran Robotics, 2014.

DORF, R. C.; BISHOP, R. H. Modern Control Systems. 13. ed. Boston: Pearson, 2016.

FRANKLIN, G. F.; POWELL, J. D.; WORKMAN, M. L. Digital Control of Dynamic Systems. 3. ed. Boston: Addison-Wesley, 1997.

GOUAILLIER, D. et al. Mechatronic design of NAO humanoid. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON ROBOTICS AND AUTOMATION, 2009, Kobe. Proceedings... Kobe: IEEE, 2009. p. 769-774.

KAJITA, S. et al. Introduction to Humanoid Robotics. Berlin: Springer, 2014.

THRUN, Sebastian; SUKHATME, Gaurav S.; SCHAAL, Stefan (Ed.). Robotics: Science and Systems I. Cambridge, MA: MIT Press, 2005.

NISE, N. S. Control Systems Engineering. 8. ed. Hoboken: Wiley, 2020.

OGATA, K. Modern Control Engineering. 5. ed. Boston: Prentice Hall, 2009.

POT, E.; MONCEAUX, J.; GELIN, R. Choregraphe: a graphical tool for humanoid robot programming. In: IEEE INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ROBOT AND HUMAN INTERACTIVE COMMUNICATION, 18., 2009, Toyama. Proceedings... Toyama: IEEE, 2009. p. 46-51.

SICILIANO, B.; KHATIB, O. (Ed.). Springer Handbook of Robotics. 2. ed. Berlin: Springer, 2016.

VUKOBRATOVIĆ, M.; BOROVIĆ, B. Zero-moment point - thirty five years of its life. International Journal of Humanoid Robotics, v. 1, n. 1, p. 157-173, 2004.

MICROCONTROLLERSLAB. PID Controller Design in Simulink. Disponível em: <https://microcontrollerslab.com/pid-controller-design-simulink/>. Acesso em: 12 ago. 2025.

KALI, Yassine; SAAD, Maarouf; BOLAND, Jean-François; FORTIN, Jonathan; GIRADEAU, Vincent. Walking task space control using time delay estimation based sliding mode of position controlled NAO biped robot. International Journal of Dynamics and Control, v. 9, n. 3, p. 679-688, 2021. DOI: 10.1007/s40435-020-00696-x.