

MÉTODOS DE CONTROLE DE MOVIMENTO DE VEÍCULO-MANIPULADORES: ACOPLADO E NÃO-ACOPLADO

Alexandre Guilherme Damm dos Santos
CPGEI - UTFPR
Av. Sete de Setembro, 3165
80230-901 Curitiba, Brazil
alexandre.2015@alunos.utfpr.edu.br

Danilo Henrique Santos
PPGCA - UTFPR
Av. Sete de Setembro, 3165
80230-901 Curitiba, Brazil
dhsdanilo@gmail.com

Piatan Sfair Palar
CPGEI - UTFPR
Av. Sete de Setembro, 3165
80230-901 Curitiba, Brazil
kpiatan@gmail.com

Abstract- Este artigo apresenta um estudo comparativo de dois métodos de controle de movimento de veículo-manipuladores: não acoplado e acoplado utilizando fuzzy. Considera-se um veículo manipulador um robô que possui um manipulador mecânico acoplado a uma plataforma móvel, dando ao manipulador uma maior área de atuação. Da mesma maneira que fornece um extenso volume de trabalho e possibilidades de realizações das mais diversas tarefas, este acoplamento aumenta também a complexidade de sua implementação, especialmente em se tratando de lidar com o movimento do veículo manipulador de maneira acoplada, trazendo mais suavidade e naturalidade ao movimento. Ao final deste estudo, apresenta-se as vantagens e desvantagens de cada sistema, assim como seus pontos similares.

1 Introdução

Durante as últimas décadas, a robótica cresceu a ponto de se tornar uma área com cada vez mais aplicações, não apenas na indústria, mas nas mais diversas áreas. Com o crescimento e expansão de locais onde a robótica é aplicada, cresceu também a demanda por robôs que saibam atuar em espaços não planejados. Robôs estão sendo empregados em locais compartilhados com objetos e seres vivos não relacionados com suas atividades e precisam lidar com essas interferências de maneira eficiente e segura. Existem robôs empregados em tarefas consideradas perigosas para serem realizadas por humanos, como por exemplo desarme de minas de áreas em conflitos militares [1], processamento de resíduos nucleares [2], movimentação de resíduos biologicamente perigosos e inspeção de estruturas químicas instáveis [3]. Pode-se citar também robôs desenvolvidos para realizar tarefas domésticas, que vão desde robôs desenvolvidos para aplicações simples como é o caso do Roomba [4], um robô aspirador de pó, a sistemas robóticos mais complexos como o robô Amy [5] que possui reconhecimento de voz, face, sistemas de navegação, assistência pessoal e automação residencial e, por fim, o robô PR2 (Personal Robot 2) [6], que possui, além das características acima citadas, dois manipuladores (Figura 1).

Recentemente a robótica tem voltado sua atenção para robôs de assistência a seres humanos com incapacidades motoras que é a chamada robótica social. Esse ramo visa melhorar a qualidade de vida de usuários com necessidades especiais como por exemplo idosos e deficientes físicos e/ou cognitivos [7] fazendo uso da interação humano-robô, manipulação e reconhecimento de objetos e navegação segura pelo dinâmico ambiente que um local residencial pode proporcionar trazendo, assim, uma maior independência no cotidiano de seus usuários. Para que um robô possa realizar tais atividades é necessário que ele possa se locomover livremente e manipular objetos com precisão. Os robôs mais adequados para essas atividades são os veículos manipuladores ou manipuladores móveis. Dentre os robôs apresentados na figura 1, apenas o PR2 faz parte desta categoria.



Figura 1: Da esquerda para a direita: Roomba, Amy e PR2

Um veículo manipulador basicamente é composto de um manipulador robótico fixado na base de uma plataforma robótica móvel. Veículos manipuladores combinam a habilidade de manuseio de objetos que oferecem os manipuladores de base fixa com a mobilidade oferecida pelas plataformas robóticas móveis. Os veículos manipuladores podem ser agrupados em categorias com base no ambiente onde são utilizados e em sua aplicação [8]. Considerando o ambiente onde os veículos manipuladores são utilizados, tem-se: Veículos manipuladores terrestres, aéreos, aquáticos, subaquáticos e espaciais.

Com o objetivo de incentivar pesquisas na área de veículos manipuladores voltados para tarefas de assistência residencial, criou-se a competição RoboCup

@Home. A iniciativa RoboCup promove diversas competições de robótica, incentivando assim pesquisas nessa área e promovendo um veículo de referência em pesquisas de robótica sendo a @Home uma de suas competições. A competição RoboCup@Home tem como objetivo incentivar o desenvolvimento de robôs de serviço e assistência doméstica com alta relevância para reais aplicações futuras. São propostas uma gama de desafios que testam habilidades e desempenho em um ambiente residencial não-padronizado [9]. As habilidades testadas são, mas não se limitam a: interação e cooperação humano-robô, mapeamento e navegação em ambientes dinâmicos, computação visual e reconhecimento de objetos em ambiente de iluminação natural, comportamentos adaptativos, padronização e integração de sistemas e manipulação de objetos.

1.1 Descrição do Problema

Enquanto veículos manipuladores oferecem um grande potencial no manuseio de objetos e outras tarefas em locais tanto estruturados (fábricas) como não estruturados (lares, ambientes externos), ao mesmo tempo trazem um alto grau de desafios que vão além da simples complexidade estrutural [10], como por exemplo o controle desses dois subsistemas de maneira uniforme. Uma solução é controlar o manipulador e o veículo de forma independente com esquemas de controle avançados. Esta solução leva à rejeição dos distúrbios induzidos no manipulador pelo movimento do veículo [3]. Outra solução é coordenar os movimentos do veículo e os do braço para realizar a tarefa da melhor maneira possível.

Para que o movimento de um veículo manipulador possa ser coordenado e com estabilidade, deve haver uma interação dinâmica e inteligente entre o movimento de sua base móvel e o movimento e atuação de seu manipulador [11]. Assim como fazer com que os robôs interajam com os humanos de forma mais natural, de maneira que os movimentos dos robôs sejam fluidos e que envolvam a estrutura completa do robô [?] de maneira acoplada.

1.2 Motivação

Um veículo manipulador apresenta não apenas o comportamento característico de cada um de seus componentes, mas também outros que são específicos da combinação destes [3]. A plataforma móvel concede ao manipulador não apenas a capacidade de se mover para a área de trabalho da tarefa, mas também a capacidade de se posicionar em um local no qual seu manipulador braço possua a máxima manipulação possível e livre de obstáculos [8].

O acoplamento entre o veículo e o manipulador gera uma variação da referência de posição e orientação do veículo quando um dos subsistemas (do veículo e do manipulador) se movimenta, o que afeta o movimento coordenado de ambos. Este acoplamento divide-se em

acoplamento dinâmico e cinemático [12]. A análise cinemática de um veículo manipulador relaciona as velocidades lineares e angulares do espaço-tarefa do efetuator final com o espaço articular, enquanto a dinâmica está relacionada à relação entre as forças que atuam sobre elas e as posições, velocidades e as acelerações que elas produzem [13]. Os tópicos a seguir apresentam os conceitos de acoplamento dinâmico e cinemático assim estudos propondo soluções para ambas as problemáticas.

2 Objetivos

O objetivo desse artigo é realizar um estudo acerca do controle do movimento de sistemas veículo-manipuladores, efetuando um comparativo de dois sistemas de controle de movimento sendo um não-acoplado e um acoplado utilizando sistema fuzzy apresentando as vantagens e desvantagens de cada método. Este estudo é a primeira parte de uma série de comparativos a respeito de métodos de controle de veículo-manipulador acoplado.

3 Revisão da Literatura

A estrutura mecânica de um manipulador robótico consiste em uma sequência de corpos rígidos (*links*) interligados por meio de articulações (juntas) [14]. Manipuladores geralmente têm sua estrutura composta de um efetuator final utilizado para manipular itens, pulso para garantir destreza ao efetuator final e braço para proporcionar mobilidade. Essa mobilidade proporcionada pelo braço se dá através de articulações entre seus *links*. Uma articulação pode proporcionar um ou mais graus de liberdade dependendo do seu tipo de junta.

Os graus de liberdade determinam os movimentos de um manipulador no espaço, sendo assim, o número de graus de liberdade que um manipulador possui é igual à somatória dos graus de liberdade de suas juntas [14]. Quanto mais graus de liberdade um manipulador possui, maior é a complexidade de sua modelagem cinemática e dinâmica devido à sua redundância. Diz-se que um veículo manipulador é considerado redundante quando possui mais graus de liberdade para realizar uma tarefa do que o necessário [15].

Considerando apenas o manipulador de um veículo manipulador, este por si só já pode possuir redundância e por consequência e sua configuração exige certa complexidade. Em um veículo manipulador, o número de graus de liberdade é a soma do número de graus de liberdade do manipulador com os da base móvel, o que eleva ainda mais o grau de complexidade.

3.1 Acoplamento Cinemático

A análise cinemática descreve conceitos de referencial, trajetória, espaço, velocidade e aceleração [16]. Logo, o acoplamento cinemático de um veículo manipulador se realiza em virtude da posição e orientação

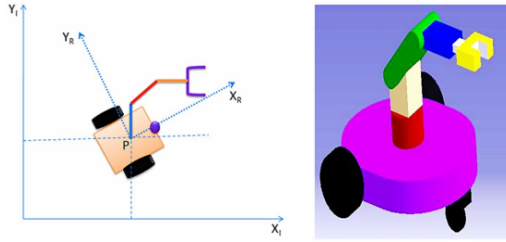


Figura 2: Estrutura básica de um veículo manipulador

do efetuador final estarem em função da postura da base móvel. Essa característica pode ser explorada aumentando o espaço de trabalho do manipulador, um problema que tem sua solução com métodos heurísticos para a solução do problema [17].

A cinemática inversa é o problema onde, dada a posição conhecida do efetuador final, obtêm-se as variáveis de junta e suas derivadas temporais que justamente o colocam na posição conhecida. A solução para este problema é de fundamental importância para transformar as especificações de movimento, atribuídas ao efetuador final no espaço operacional, nas correspondentes movimentações espaciais conjuntas que permitem a execução do movimento desejado [14].

Diferente da cinemática direta, onde é possível determinar univocamente a posição e orientação do efetuador final, o problema da cinemática inversa é muito mais complexo, em razão das equações serem, em geral, não-lineares e, portanto, nem sempre é possível encontrar uma solução única, e também pela possibilidade de existência de soluções infinitas, por exemplo, no caso de um manipulador redundante [14].

Sabendo-se que para o veículo a sua posição corresponde a sua própria variável de estado e, por sua vez a base do manipulador tem sua posição constante em relação ao veículo, o único problema da cinemática inversa é em relação ao manipulador [18]. Porém a problemática da cinemática inversa aplicada em veículos manipuladores operando em ambientes confinados ou com ocorrência de obstáculos pode levar o manipulador à configurações degenerativas, ou seja, singularidades.

As singularidades representam configurações que reduzem a mobilidade da estrutura, ou seja, não é possível impor movimentos arbitrários ao efetuador para uma determinada direção. A ocorrência de singularidades pode gerar a degradação da mobilidade, o que interfere diretamente no seguimento da trajetória de sistemas robóticos [12], restringindo movimentações influentes no desempenho do sistema como um todo. Uma singularidade surge quando o manipulador está totalmente estendido ou dobrado. Sendo assim, o local desejado para o efetuador final não está ao alcance do manipulador e portanto o efetuador final não pode ser alcançado.

3.2 Acoplamento Dinâmico

A análise dinâmica de um veículo manipulador estuda a relação entre as forças e torques aplicados pelos atuadores seu movimento ao longo do tempo e as causas que os produzem e os modificam. O princípio teórico por trás da dinâmica do corpo rígido é bastante direto: estende-se as leis de Newton para a dinâmica de uma massa pontual em corpos rígidos, que não são mais senão conglomerados de massas pontuais que mantêm distâncias constantes umas com as outras [13]. No entanto, a interconexão de corpos rígidos por meio de juntas dá origem a novas propriedades físicas que não existem para uma única massa pontual ou um único corpo rígido.

O acoplamento dinâmico controla e analisa as forças transmitidas do manipulador para a base móvel variando em relação à direção e trajetória do manipulador. Esses componentes atuam como perturbações do veículo e portanto, influenciam na posição e orientação do efetuador [12]. Dois fatores dificultam o problema do acoplamento dinâmico de um veículo manipulador: um manipulador e uma plataforma móvel tem, em geral, dinâmicas distintas, pois a base móvel possui uma resposta dinâmica mais lenta do que a do manipulador [19].

3.3 Frameworks e Métodos Inteligentes de Acoplamento

Há ainda métodos de planejamento de trajetória e controle de movimentos que abordam o problema em um nível mais alto, utilizando as soluções de baixo nível já extensivamente analisadas em estudos alguns dos quais citados neste artigo. Em um destes estudos, Mbde e Zhang [20] desenvolveram um controlador de movimento inteligente baseado na combinação de sistemas fuzzy e redes neurais, os chamados sistemas neuro-fuzzy, recorrentes para tratar das singularidades dinâmicas de movimento ou ambiente do veículo manipulador. Este método apresentam dois controladores adaptativos de movimento Neuro-Fuzzy para suprir as necessidades de automação de um veículo manipulador. O primeiro controlador, baseado em um esquema de processamento computacional eficiente para navegação reativa fuzzy é utilizado para gerar os comandos dos subsistemas do manipulador robótico. O segundo controlador fuzzy é implementado na base móvel, mantendo um caminho flexível e permanente entre os dois nós da rede gerado por uma abordagem de rota probabilística.

A proposta de integrar controladores robustos a redes neurais é lidar com dinâmicas não modeladas, restrições de estrutura e movimento. Para o manipulador, é aplicada um algoritmo de navegação reativa fuzzy, já para a base móvel são combinadas as vantagens de um planejador de rota global com as vantagens do planejador reativo fuzzy de maneira a tornar o sistema de navegação mais flexível [20], isso possibilita a reação a mudanças no ambiente e assim, desviar de obstáculos dinâmicos.

O sistema fuzzy de navegação da plataforma móvel, neste estudo, possui três tipos de variáveis de entrada: A primeira entrada são dados sensoriais representados pela distância d_v na qual é a diferença entre a distância mínima d_{min} fornecida pelo sensor e a distância mínima fornecida da. A segunda variável de entrada é , a diferença e_v entre a localização q_{li} do veículo e a posição q_{vi} do próximo nó n_i . E, por fim, considerações de estabilidade, mobilização e manipulação do sistema são o terceiro dados de entrada variáveis. Na "fuzzyficação", módulos transformas as variáveis numéricas em conjuntos fuzzy que podem ser manipulados pelo controlador e na "defuzzyficação" dois conjuntos de resultados são obtidos para gerar valores numéricos. Esses valores são utilizados para ajustes de torque e correção de posição do manipulador.

Considerando a individualidade dos dois sistemas fuzzy, torna-se necessário uma abordagem que torne o planejamento de movimento cooperativo entre o manipulador e a base móvel. Sabe-se que o movimento do veículo afeta principalmente a estabilidade do sistema: por exemplo, o robô cai facilmente se a velocidade ou aceleração do veículo estiver alta. Uma vez que a amplitude de movimento do manipulador não será grande, dada uma trajetória do ponto final, o manipulador tem apenas capacidade limitada para ajudar a estabilidade [20]. Portanto, Mbede e Zhang (2004) propõem o algoritmo de coordenação apresentado na figura 3.

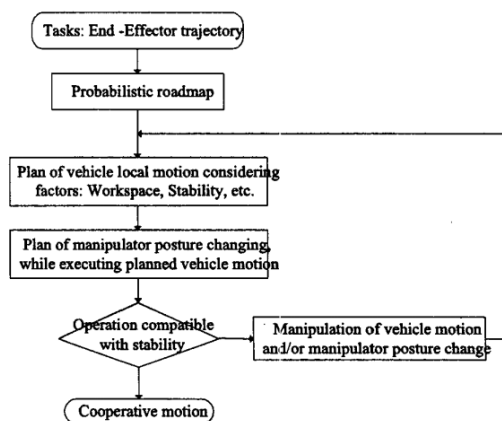


Figura 3: Algoritmo de planejamento de movimento cooperativo.

Os resultados obtidos em simulação demonstraram a efetividade do controle proposto, onde o movimento é executado de maneira inteligente, e estável, trazendo um alto nível de autonomia para o sistema geral. Sua desvantagem é ainda solucionar o problema desenvolvendo sistemas individuais que comunicam entre si, não possuindo exatamente uma maneira efetiva de movimentação de corpo completo.

[21] propõe uma versão fuzzy qualitativa (*qualitative fuzzy - FQ*) para a modelagem cinemática com o objetivo agregar funções simbólicas ou qualitativas a tarefas de controle numérico para a robótica inteligente. Trata-se de uma solução que propõe realizar a ligação de

controles de baixo nível a funções de alto nível restando, assim, a estrutura matemática do problema. Para realizar essa abordagem primeiro, revisou-se a trigonometria FQ e afim de obter sua extensão derivada. Em seguida, substituiu-se o papel da trigonometria na cinemática do robô usando a trigonometria FQ e a extensão derivada proposta, o que levou a uma versão FQ da cinemática robótica.

A cinemática FQ do veículo manipulador possui duas vantagens: pode ser usado como uma ferramenta para medir problemas de calibração robótica, por exemplo, precisão, repetibilidade e calibração e proporciona uma oportunidade para conectar dados numéricos e funções simbólicas juntos, esses elementos podem funcionar como funções de comportamento atômico que poderiam ser usadas para construir vocabulários de comportamento de um robô e seu controle de movimento.

4 Metodologia

Para realizar o estudo e consequentemente a validação do comparativo de um sistema de veículo-manipulador acoplado com um sistema não-acoplado, utilizou-se uma tarefa de manipulação básica. A tarefa implementada pelo veículo-manipulador trata-se a coleta de um objeto distante à sua plataforma móvel. Dessa maneira, o veículo-manipulador deve aproximar a sua plataforma móvel para conseguir utilizar seu manipulador para atingir o objetivo.

A coleta e os resultados são obtidos e validados por meio de três variáveis: tempo médio de execução da tarefa, estabilidade e precisão.

Essa tarefa é implementada no ambiente simulado VREP utilizando um manipulador industrial IRB140 acoplado a uma plataforma móvel (Figura 4) de duas rodas diferenciais com sistemas de controle de posição e movimentação distintos. A plataforma móvel possui odometria para navegação e controle de velocidades linear e angular e o manipulador possui controle de posição e orientação por meio de cinemática inversa.

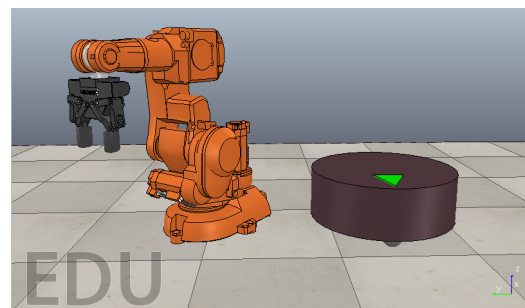


Figura 4: Manipulador IRB140 e plataforma móvel.

Ambos os sistemas de controle de movimento são desenvolvidos em Matlab e sua comunicação com o simulador é obtida por meio do sistema operacional robótico ROS, que recebe os sinais de posição e orientação de cada subsistema (manipulador e plataforma móvel) e

envia essas informações ao Matlab que, após processamento, retorna a posição e orientação desejadas ao simulador.

Para estes sistemas, foram definidos alguns parâmetros para possibilitar uma melhor execução da tarefa definida. Entre esses parâmetros estão: a distância mínima de 0.7m na qual plataforma móvel deve chegar com relação ao objeto a ser manipulado; a velocidade linear máxima de 0.3m/s; a velocidade angular mínima de 1.8m/s na qual a plataforma móvel deve atingir.

O sistema não-acoplado possui controle de movimento proporcional ao erro de maneira a evitar movimentações bruscas e garantir a precisão ao atingir o objetivo tanto da plataforma móvel quanto do manipulador. Por não possuir um movimento simultâneo dos dois sistemas, primeiramente a plataforma móvel se aproxima do objetivo para, então, seu manipulador móvel coletar o objeto.

Para o sistema acoplado, utilizou-se lógica Fuzzy para que o movimento do manipulador e da plataforma móvel seja realizada coordenadamente.

Na base de dados do sistema Fuzzy implementado, têm-se uma variável linguística de entrada denominada Distância, que é a distância em metros da plataforma móvel em relação ao objeto a se manipulado. Seu universo é o intervalo $[0.7, 2.7]$ e foi particionado de maneira uniforme. O conjunto dos termos linguísticos que a variável Distância pode assumir é dado pelas funções triangulares primárias: Perto, Médio e Longe e as com modificadores: Muito Perto e Muito Longe. O sistema fuzzy implementado apresenta múltiplas saídas. Uma delas é a velocidade da base móvel e é denominada v_{Bob} , de universo $[0, 0.5]$. O conjunto de termos linguísticos da variável linguística v_{Bob} é: Muito Devagar, Devagar, Média, Rápida e Muito Rápida. Outra variável linguística de saída é a distância relativa do manipulador para a plataforma móvel, denominada $d_{Gripper}$ de universo $[0, 1]$. O conjunto dos termos linguísticos de $d_{GripperXY}$ e $d_{GripperZ}$ é semelhante ao da variável Linguística Distância, porém cada conjunto com sua partição de universo apropriada. A base de regras foi implementada da seguinte maneira:

1. Se a Distância é Muito Longe, então v_{Bob} é Muito Rápida, $d_{Gripper}$ é Muito Perto.
2. Se a Distância é Longe, então v_{Bob} é Rápida, $d_{Gripper}$ é Perto.
3. Se a Distância é Média, então v_{Bob} é Média, $d_{Gripper}$ é Média.
4. Se a Distância é Perto, então v_{Bob} é Devagar, $d_{Gripper}$ é Longe.
5. Se a Distância é Muito Perto, então v_{Bob} é Muito Devagar, $d_{Gripper}$ é Muito Longe.

Como agregação das regras, foi adotado o Máximo e como Método de Defuzzyficação, o Centróide.

Com o objetivo de manter a estabilidade do manipulador móvel, estipulou-se uma área de manipulação permitida para o manipulador poder interagir com o ambiente conforme é possível verificar na Figura 5. Dessa maneira, o veículo-manipulador mantém a estabilidade enquanto seu efetuator final se mover apenas na área permitida.

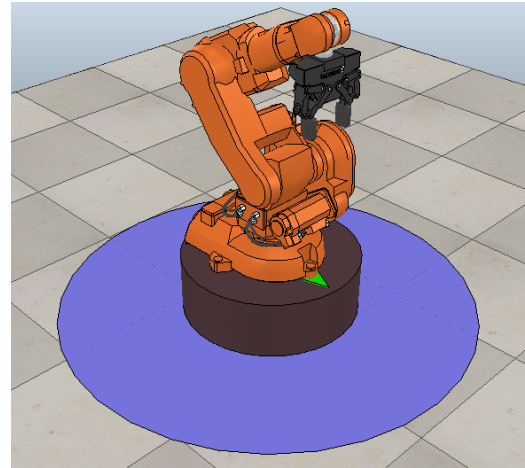


Figura 5: Área de manipulação do veículo-manipulador.

5 Simulações e Resultados

Nos testes realizados em simulação, o sistema de movimento não-acoplado do veículo manipulador realizou o objetivo em um tempo médio de 33.9s. Seu movimento se mostrou estável e sua precisão foi validada considerando a coleta correta do objeto em todas as simulações realizadas nesse sistema.

Seu movimento foi controlado por meio do cálculo de proporcional, evitando movimentações bruscas. Porém, como não se trata de um movimento acoplado, seu movimento se mostrou relativamente lento e não apresentou naturalidade, ou seja, efetuou um movimento por vez.

Já o sistema acoplado com fuzzy foi capaz de realizar o objetivo com um tempo médio de 24.7s, que representa um tempo 27% menor. Além disso, por movimentar a plataforma móvel e o manipulador de maneira coordenada (Figura 6), seu movimento se mostrou mais natural e dinâmico em relação ao sistema não-acoplado.

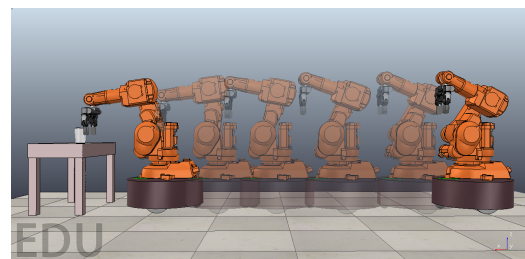


Figura 6: Evolução do movimento proporcionado pelo sistema acoplado.

6 Conclusões

Conforme esperado, ambos os sistemas obtiveram bons resultados nos quesitos estabilidade e precisão. Em se tratando de tempo de realização da tarefa, o sistema acoplado utilizando fuzzy teve um resultado significativamente menor do que o sistema não acoplado.

Em se tratando da realização de um movimento mais natural, apesar de ser um termo abstrato e de difícil mensuração, os sistemas obtiveram resultados contrastantes, sendo o sistema acoplado o que possuiu um movimento mais natural. Sendo assim, são altas as vantagens na utilização de um sistema acoplado utilizando fuzzy em relação a um sistema não acoplado.

Como trabalhos futuros pretende-se realizar novos comparativos de sistemas acoplados por meio de outros métodos, como por exemplo redes neurais artificiais e frameworks de inteligência artificial.

Referências

- [1] P. Desbats, F. e Sgarbi, “An open Manipulation System for the Development of Advanced Nuclear and Industrial Applications using a Manipulator Robot embedded on a Vehicle,” *Proc of 24th Int. Symp. on Industrial Robots, Tokio - Japan*, 1993.
- [2] D. F. C. F. Fraisse, P., “Mobile Manipulation of Fragile Objects,” *4th Int. Symp. on Experimental Robotics, Stanford - California*, 1995.
- [3] C. L. D. P. F. P. Perrier, C., “Position/Force Control of a Manipulator Mounted on a Vehicle,” *Journal of Robotic Systems 13(11)*, pp. 687-698, 1996.
- [4] iRobot, “Disponível em: <http://www.irobot.com/for-the-home/vacuuming/roomba.aspx>.”
- [5] AmyRobotics, “Disponível em: <http://www.amyrobotics.com/robot/>,” Último acesso em 09 de Agosto de 2017.
- [6] WillowGarage, “Disponível em: <http://www.willowgarage.com/pages/pr2/overview>.”
- [7] P. M. S. Bastos, “Robótica de assistência e seus aspectos humanitários,” Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG, 2014.
- [8] M. Mashali, “Kinematic Control of Redundant Mobile Manipulators,” *University of South Florida - Scholar Commons*, 2015.
- [9] Robocup, “Disponível em: <http://robocup.org>.”
- [10] X. Yamamoto, Y. e Yun, “Modeling and Compensation of the Dynamic Interaction of a Mobile Manipulator,” *IEEE - Conference*, 1994.
- [11] Y. M. e. M. A. Furuno, S., “Trajectory Planning of Mobile Manipulator with Stability Considerations,” *International Conference on Robotic Automation*, 2003.
- [12] A. S. Oliveira, “Análise cinemática via quatérnios duais aplicada a um sistema veículo-manipulador subaquático,” Tese de Doutorado - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Automação e Sistemas, 2011.
- [13] S. S. Li, Z. Ge, “Fundamentals in Modeling and Control of Mobile Manipulators,” Taylor Francis Group, LLC, 2009.
- [14] B. Siciliano, “Robotics: modelling, planning and control,” *Advanced Textbooks in Control and Signal Processing*, 2009.
- [15] B. Sciavicco, L e Siciliano, “Modelling and Control of Robot Manipulators,” Spain: Springer, 2000.
- [16] C. M. A. e. P. P. C. M. Ferraro, G. F. e Torres, “Vereda digital - física,” Editora Moderna - Ed. 1, 2012.
- [17] G. Dunnigan, M. e Russell, “Evaluation and reduction of the dynamic coupling between a manipulator and an underwater vehicle,” *IEEE Journal of Oceanic Engineering* v. 23, n. 3, p. 260-273, 1998.
- [18] B. B. Parodi, “Controle coordenado de posição e força de uma manipulador sobre plataforma móvel emulando um roV,” Depto de Engenharia Elétrica - Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2003.
- [19] X. Yamamoto, Y. e Yun, “Coordinating Locomotion and Manipulation of a Mobile Manipulator,” *31st Conference on Decision and Control*, 1992.
- [20] L. Mbede, J. B. e Zhang, “Robust Neuro-Fuzzy Manipulator among Navigation of Mobile Dynamic Obstacles,” *International Conference on Robotics and Automation - New Orleans*, 2004.
- [21] B. D. J. e. C. G. M. Liu, H., “Fuzzy Qualitative Robot Kinematics,” *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, Vol 16, n. 3, 2008.