

IMPACTO DA LATÊNCIA EM SISTEMAS CYBER-FÍSICOS EM NUVEM: MÉTRICAS SUBJETIVA E OBJETIVA PARA ANDADOR ROBÓTICO

RICARDO C. DE MELLO*, MARIO F. JIMENEZ*, FRANCO V. DE SOUZA*, MOISES R. N. RIBEIRO*,
ANSELMO FRIZERA NETO*

*Núcleo de Tecnologia Assistiva, Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica
Universidade Federal do Espírito Santo
Vitória, Espírito Santo, Brasil

Emails: ricardo.c.mello@aluno.ufes.br, mario.hernandez@aluno.ufes.br,
franco.souza@aluno.ufes.br, moises@ele.ufes.br, anselmo@ele.ufes.br

Abstract— The progress of embedded systems into cyber-physical cloud systems is driven by decreasing the need for computing power available in the device and for enabling the day-to-day use of increasingly powerful applications. This paradigm shift applied to robotic systems (such as smart walkers) can make it possible to simplify the hardware of these devices and expand their capabilities. In order to avoid problems for the real-time control algorithms, communication issues between the device and the cloud platform and network latency, should have their impacts investigated. This paper proposes a discussion and a case study to evaluate latency effects on the quality of experience of the user when following a predetermined path with the UFES Smart Walker.

Keywords— Smart Walker, cloud robotics, rehabilitation, robotic systems.

Resumo— A migração do uso de sistemas embarcados para sistemas cyber-físicos em nuvem se mostra uma tendência por diminuir sensivelmente a necessidade de poder computacional disponível no dispositivo e por viabilizar a utilização cotidiana de aplicações cada vez mais poderosas. Essa mudança de paradigma aplicada a sistemas robóticos como os andadores inteligentes pode possibilitar a simplificação do hardware destes dispositivos e ampliar suas capacidades. Para que não haja prejuízo na utilização em tempo real de algoritmos de controle, questões como a comunicação entre o dispositivo e a plataforma em nuvem, assim como a latência na rede, devem ser discutidas e ter seus impactos verificados. Este trabalho propõe uma discussão acerca desses fatores e realiza um estudo de caso para avaliar seus efeitos na qualidade da experiência dos usuários e no seguimento de um caminho pré-determinado com o andador UFES *Smart Walker*.

Palavras-chave— Andador robótico, robótica em nuvem, reabilitação, sistemas robóticos.

1 Introdução

A população mundial está envelhecendo e há uma tendência de piora gradual da mobilidade devido a problemas associados ao envelhecimento (Cifuentes et al., 2014). Transtornos relacionados com a mobilidade reduzem a independência do indivíduo, dificultam a realização de certas tarefas cotidianas e os tornam mais susceptíveis a quedas e acidentes.

Diferentes dispositivos de assistência à mobilidade, como bengalas, cadeiras de rodas e andadores, são apresentados como alternativas a tais problemas e versões avançadas vêm sendo estudadas e desenvolvidas em diferentes Grupos de Pesquisa. Os andadores, em especial, são desenhados para melhorar a marcha patológica através do suporte aos membros superiores, aproveitando a capacidade de locomoção do usuário e reduzindo os efeitos de problemas associados às desordens de marcha (Kulyukin et al., 2008).

A integração da robótica com andadores tradicionais deu origem ao dispositivos chamados andadores inteligentes que se valem de sistemas de controle capazes de identificar as intenções de movimento do usuário e auxiliá-los de acordo com suas necessidades (Rodriguez et al., 2013). Embora suas vantagens superem as dos andadores tradicionais, o custo da eletrônica embarcada po-

deria ser considerado como um dos fatores que inviabilizaria sua utilização: potenciais usuários podem considerar o custo de tais plataformas como proibitivo e instalações médicas podem limitar sua aquisição.

A migração de sistemas que dependem do *hardware* embarcado para realizar o processamento de dados e os algoritmos de controle para os chamados sistemas cyber-físicos se mostra uma tendência (Rajkumar et al., 2010). Assim, tarefas de processamento computacional, como monitoramento e controle, são delegadas à plataformas de computação remota, mitigando a necessidade de poder computacional existente no dispositivo.

A integração de sistemas cyber-físicos com conceitos de computação em nuvem expande a sua capacidade, dando origem aos sistemas robóticos em nuvem (do inglês *cloud robotics*) (Goldberg and Kehoe, 2013). Assim, este paradigma viabiliza a utilização de robôs menos complexos e custosos em tarefas não-estruturadas (Yoshikane et al., 2016). Dispositivos como os andadores inteligentes podem se beneficiar de variadas maneiras pois, quanto mais funcionalidades são requeridas por esses sistemas, maior a complexidade dos algoritmos de controle utilizados e maiores os custos computacionais envolvidos. Algoritmos responsáveis desde a prevenção de quedas até a guiagem do usuário podem ser empregados de forma mais

eficiente a fim de melhor se ajustar às necessidades do usuário. Dessa forma, as variadas técnicas de navegação, desvio de obstáculos, planejamento de trajetória, entre outras estabelecidas na literatura podem ser empregadas remotamente apesar de possíveis limitações de poder computacional do dispositivo.

Kehoe et al. (2015) cita quatro áreas cujo recente crescimento fomenta o potencial de utilização da nuvem, segue sua exemplificação: (i) *big data*, com bibliotecas remotas de imagens, mapas e dados; (ii) computação em nuvem, com a paralelização de tarefas para aprendizado e planejamento de movimento; (iii) aprendizado coletivo, com robôs compartilhando ações, diretrizes de controle e resultados; e (iv) computação humana, com aproveitamento da expertise humana de análise, classificação e aprendizado. Já Wan et al. (2016) vai além e cita aplicações *open source* como motivadores para a robótica em nuvem ao destacar o uso do *Robot Operating System* (ROS) e a iniciativa RobotEarth. O ROS é um *framework* de controle conhecido da comunidade científica e seu intensivo uso por diferentes grupos permite uma intercambialidade de códigos que pode reduzir sensivelmente o tempo necessário para novos desenvolvimentos. Já o RoboEarth é um *website* dedicado a prover serviços para sistemas robóticos que funciona como uma grande base de dados onde robôs podem aprender a partir da experiências e outros robôs.

Estes conceitos e sistemas já foram utilizados em variadas aplicações (Jordán et al., 2013). Sua utilização pode ampliar as capacidades dos andadores inteligentes na utilização de algoritmos de controle mais complexos e na realização de tarefas como: localização e mapeamento, troca de informações entre dispositivos, processamento de imagens, entre outras, sem implicar em aumento na complexidade do *hardware*.

Este trabalho propõe discutir os impactos da utilização de um andador robótico como sistema cyber-físico em nuvem. Por ser um sistema de tempo real que interage fisicamente com o usuário, há de se observar restrições na migração do controle local do andador para uma plataforma remota, onde, talvez, o fator mais importante seja a latência (i.e. tempo decorrido entre o envio e recebimento de um pacote) na rede utilizada para comunicação entre o dispositivo e a plataforma. Dessa forma, é realizado um estudo de caso para verificação desses efeitos na utilização de um andador robótico, bem como realizada uma discussão mais geral a fim de se viabilizar tal mudança de paradigma.

Assim, este trabalho se divide em outras três seções. A Seção 2 discute como andadores robóticos podem se beneficiar dessa mudança de paradigma, descreve o andador UFES *Smart Walker* e o protocolo experimental empregado no estudo

de caso realizado. A Seção 3 apresenta os resultados obtidos durante os experimentos. Por fim, a Seção 4 apresenta as conclusões deste estudo e discute possibilidades e campos a serem explorados em trabalhos futuros.

2 Materiais e Métodos

2.1 Andador Robótico

A interação do conjunto usuário, andador, e ambiente é amplamente estudada na literatura e, dada as condições físicas e cognitivas que normalmente levam as pessoas a fazerem uso destes dispositivos, funcionalidades de assistência física, sensorial e cognitiva são empregadas no auxílio a uma navegação segura (Elias et al., 2012).

Neste contexto, o andador inteligente UFES *Smart Walker* (Figura 1), desenvolvido na Universidade Federal do Espírito Santo, foi tema de diversos trabalhos de pesquisa publicados nos últimos anos (Cifuentes et al., 2016; Valadão et al., 2016; Rodriguez et al., 2013). Com cinemática de robô uniciclo, este andador conta com uma roda livre e duas rodas de tração acopladas a motores DC. *Encoders* H1 (US Digital, EUA) e um sensor inercial BNO055 (Adafruit, EUA) são utilizados para recuperar a velocidade e orientação do dispositivo. Dois sensores de força 3D MTA400 (Futek, EUA) ficam posicionados sob os apoios de antebraço para a obtenção das forças de interação com o usuário. Dois sensores de varredura laser, URG-04LX (Hokuyo, Japão) e RP-Lidar (Robo Peak, China), são utilizados para capturar a posição das pernas da pessoa em relação ao andador e também informações do ambiente. O sistema de computação embarcado consiste na plataforma PC/104-Plus, integrada com a arquitetura de tempo real baseada no Simulink Real-Time.

2.2 Métodos

Ao alocar algoritmos de controle em uma plataforma de computação em nuvem, delegando ao dispositivo físico apenas a aquisição de dados sensoriais e a execução de ações de controle, a latência na rede não pode ser ignorada (Wan et al., 2016). Além da latência, deve-se levar em consideração sua variabilidade e também a possibilidade de perdas e desordem de pacotes durante a transmissão, problemas difíceis de evitar, especialmente em redes sem fio (Zhang et al., 2013). O UFES *Smart Walker* se apresenta como um sistema de tempo real que, por interagir fisicamente com o usuário, verifica exigências de baixa latência. Há ainda o risco de perda temporária na conexão e, por esses motivos, é comum que sistemas robóticos em nuvem mantenham alguma capacidade de processamento local para períodos de instabilidade no acesso a rede (Kehoe et al., 2015). Todos esses fa-

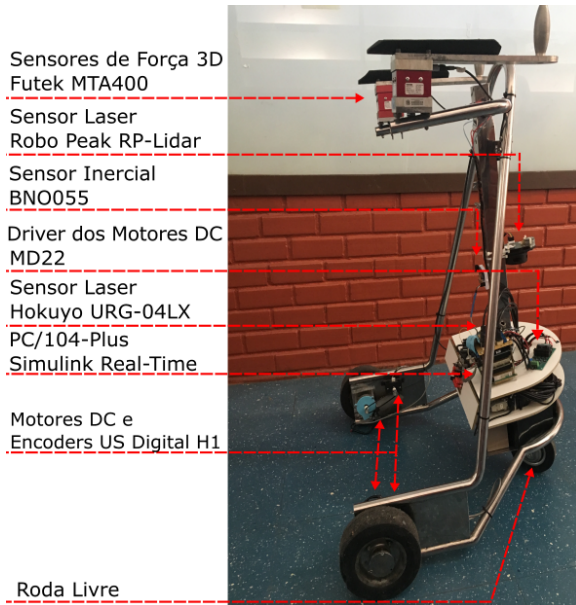


Figura 1: UFES *Smart Walker*, detalhamento do sistema

tores podem afetar a qualidade do serviço tal qual percebida pelo usuário.

A fim de se avaliar e discutir os efeitos da latência e sua variabilidade no uso de um andador robótico, deve-se levar em consideração não apenas métricas objetivas normalmente aplicadas a sistemas robóticos. A qualidade da experiência do usuário, avaliada de forma subjetiva tal qual percebida pela pessoa, é de fundamental importância.

Dessa forma, como estudo de caso, este trabalho avalia uma tarefa de seguimento de caminho por parte de um usuário utilizando o andador UFES *Smart Walker* como ferramenta de apoio. O andador se vale da intenção de movimento da pessoa e tem o controle baseado nas forças de interação física entre usuário e andador captadas pelos sensores de força, numa versão simplificada do controle de Rodriguez et al. (2013):

$$v = K_1(F_r^f + F_l^f) \quad (1)$$

$$\omega = K_2(F_r^f - F_l^f) \quad (2)$$

onde v e ω representam a velocidade linear e angular, respectivamente, do andador, K_1, K_2 são constantes de proporcionalidade e F_r^f, F_l^f são os sinais de força captados pelos sensores direito e esquerdo, respectivamente, filtrados por um filtro passa-baixa de primeira ordem.

A fim de emular efeitos de latência e sua variabilidade, simula-se localmente o controle remoto do dispositivo introduzindo-se diferentes condições de atraso na malha de controle. O usuário deve, então, conduzir o andador por sobre o caminho sob as diferentes condições de atraso. Por fim, o caminho percorrido é comparado ao caminho desejado e a experiência do usuário é avaliada

pelo mesmo. O diagrama de blocos da Figura 2 ilustra a arquitetura do sistema emulado.

2.3 Protocolo Experimental

As variáveis de controle, o caminho e as condições de teste foram determinados de forma a explorar os efeitos de diferentes condições de latência no uso do andador. O caminho desejado (ver Figura 3) é traçado no chão e o usuário é instruído a segui-lo.

As variáveis de controle são definidas a fim de se permitir a fácil condução do andador, sem exigir a aplicação de grandes forças por parte do usuário, e permanecem estáticas durante todos os testes. A frequência de amostragem dos sensores, atuadores e de execução do sistema de controle é de 100Hz. Dentro da malha de controle é introduzido um algoritmo para simular a latência da rede antes do envio do sinal aos atuadores (Figura 2). Este algoritmo atua por amostras: a cada amostra, o sinal de controle atual é registrado em um *buffer* em uma posição determinada por um valor de atraso e o sinal do início da fila é enviado aos atuadores. Os valores de atraso podem variar e causar desordem entre sinais de controle novos e antigos. Sinais antigos podem ser sobrescritos e, em caso de não haver registro no início fila, o sinal de controle enviado no último instante é repetido.

Dez condições de teste foram estabelecidas, diferenciadas entre si pela latência aplicada na malha de controle. Uma condição apresenta zero latência, emulando o controle local. Outras três condições de teste expressam situações onde a latência é fixa em 100, 200 e 300ms. As seis condições de teste restantes utilizam valores aleatórios de latência com médias de 100, 200 e 300ms. Esses valores seguem a probabilidade de distribuições normais com variância 4 e $9\mu s^2$.

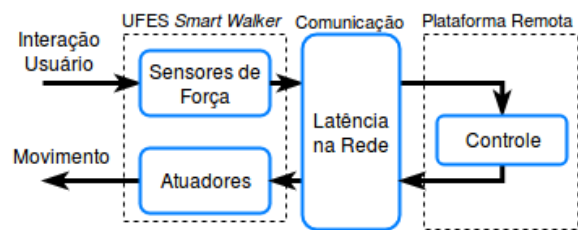


Figura 2: Diagrama de blocos que ilustra a arquitetura do sistema emulado

2.4 Métricas Utilizadas

Duas métricas foram utilizadas para quantificar o seguimento de caminho. A primeira diz respeito à experiência do usuário, onde participantes gradua sua experiência de acordo com a escala MOS, de 1 a 5, onde 1 indica uma experiência “péssima”, enquanto 5, “excelente” (International Telecommunication Union, 1996). Já a segunda é

uma métrica objetiva chamada Erro Cinemático de Seguimento (ECS) (Frizera Neto et al., 2010), onde o caminho percorrido é comparado com o caminho desejado (equação 3).

$$ECS = \sqrt{|\bar{\varepsilon}|^2 + \sigma^2} \quad (3)$$

Onde $|\bar{\varepsilon}|$ é o valor médio do erro absoluto entre os pontos que descrevem o caminho percorrido e desejado, e σ^2 é a variância desses valores de erro. Ou seja, o ECS cresce com o aumento da média e da variância do erro entre os caminhos comparados. Dessa forma, se leva em consideração tanto erros estacionários quanto oscilações no erro, ambos fatores que refletem diretamente a dificuldade de se manter o dispositivo sobre o caminho desejado.

2.5 Participantes

Ao todo, cinco voluntários participaram dos experimentos, todos eles saudáveis, com idade média de 27,8 ($\sigma = 4,1$) anos e massa média de 72,6kg ($\sigma = 9,1$). Dois dos voluntários já haviam utilizado o UFES *Smart Walker* anteriormente, enquanto os outros 3 o utilizaram pela primeira vez nestes testes. Cada um deles foi submetido às 10 condições de teste, em ordem aleatória para evitar que a prática continuada gerasse distorções na avaliação. Esta Pesquisa foi aprovada pelo Comitê de Ética em Pesquisa (parecer n. 1.861.285, CAAE 51685515.3.0000.5284), seguindo as normas da Lei 196/96.

3 Resultados e Discussão

A Figura 3 apresenta o caminho desejado junto de alguns exemplos de caminhos percorridos por diferentes usuários em variadas condições de teste. Cada uma dessas condições de teste está expressa em termos de latência média e variância e a Figura 3 exemplifica o que foi observado na prática: o aumento da latência parece dificultar a condução do andador por parte do usuário, induzindo percursos oscilatórios.

As médias e desvios padrões dos resultados obtidos para cada um dos testes podem ser observados na Figura 4, onde cada barra representa uma condição específica de teste, agrupadas e coloridas de acordo com os valores de variância e média utilizados para gerar os valores de latência. A Figura 4.a) mostra os valores obtidos na escala MOS tal qual avaliados pelos usuários. Nota-se uma clara correlação entre o aumento na latência da rede e a degradação da experiência do usuário, embora o aumento na variabilidade da latência preliminarmente não pareça impactar a ponto de implicar avaliações negativas na métrica subjetiva.

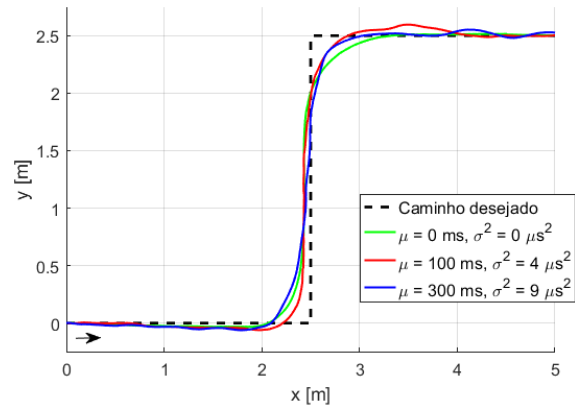


Figura 3: Caminho desejado e exemplos de caminhos percorridos para diferentes condições de teste, expressas em termos de latência média e variância

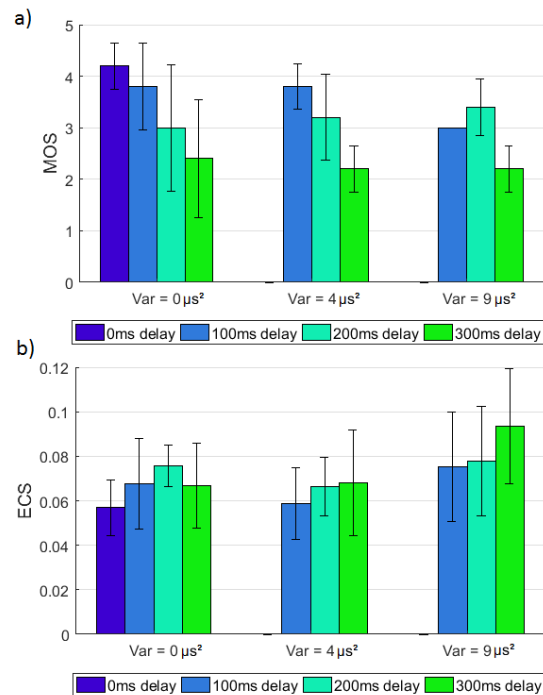


Figura 4: Média e desvio padrão dos resultados para cada condição de teste, agrupados por condição de variabilidade na latência e coloridos pela latência média. a) Escala MOS b) Erro Cinemático de Seguimento (ECS)

A Figura 4.b) apresenta os valores obtidos para análise objetiva via o ECS. Conforme esperado, o menor valor observado foi na situação onde não há atraso na malha de controle (0ms). O aumento da latência média parece induzir uma maior dificuldade no seguimento de caminho, embora essa dificuldade não se mostre tão intensa com o aumento na variação dessa latência. O ECS, por ser composto pelo erro médio e pela variância do erro de seguimento observado em cada teste, não deve ser avaliado somente de forma isolada. As Figuras 5.a) e 5.b) trazem, respectiva-

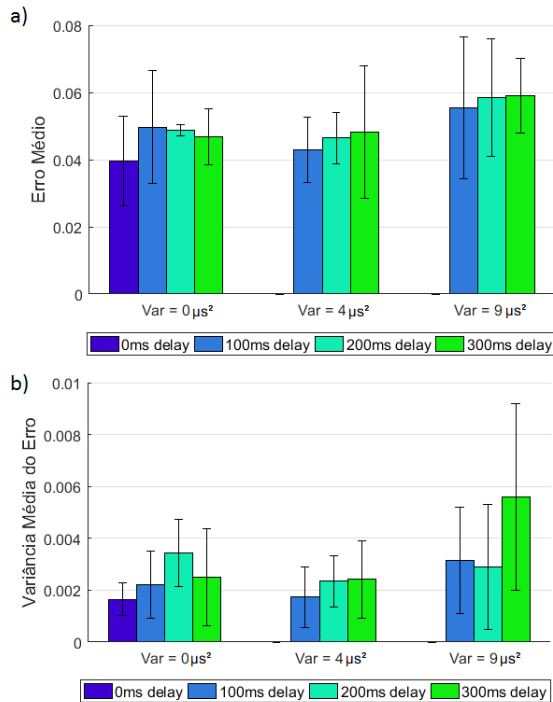


Figura 5: Média e desvio padrão para cada condição de teste dos fatores que compõem o ECS. a) Erro médio no seguimento do caminho b) Variância do erro no seguimento do caminho

mente, o erro médio de seguimento e a variância média desses erros. Enquanto o erro médio mostra uma leve tendência de crescimento com a latência e sua variação, a variância do erro parece refletir de forma mais intensa a qualidade da experiência do usuário.

A fim de se discutir os resultados obtidos, algumas observações se fazem necessárias. O atraso no sinal de controle e a desordem causada neste sinal pela variabilidade da latência ocasionam interações inesperadas e, eventualmente, intensas entre usuário e andador. Frequentemente esse tipo de interação obriga o usuário a puxar o andador em sua direção, induzindo o escorregamento das rodas e degradando a odometria. Ao não escapar demasiadamente do caminho desejado, esse fator não se mostra claro no ECS, porém ocasiona maior variabilidade no erro de seguimento e talvez por isso esta métrica, a variância do erro, pareça refletir melhor a experiência do usuário.

Outra observação que deve ser feita está relacionada com as condições de teste com maior variabilidade na latência, que parecem de certa forma aleatorizar a sequência dos sinais de controle enviados aos atuadores, ocasionando os grandes desvios padrões observados no terceiro grupo de barras das Figuras 4.b), 5.a) e 5.b). Por fim, notou-se que ao se utilizar o andador de forma vagarosa e com apoio significativo de peso sobre os suportes para membros superiores, os fatores anteriormente mencionados são mitigados.

A quantidade de voluntários utilizados no experimento, embora pequena, é suficiente para indicar fortes tendências de piora no controle do andador com o aumento da latência e sua variação. O valor médio da latência parece ser preponderante para a experiência do usuário enquanto que o aumento da sua variação não parece afetar de forma muito significativa a avaliação subjetiva. Quanto às métricas objetivas, a variância do erro entre caminho desejado e percorrido indica o quão oscilatório foi o percurso. Este fator parece refletir melhor a experiência do usuário do que outras métricas, como o erro médio ou o próprio ECS.

Enfim, há de se ressaltar que atrasos de 100, 200 e 300ms representam 10, 20 e 30 amostras no controle, respectivamente. Ao se avaliar os menores valores de variância aplicados à latência nota-se que mesmo atrasos médios de 10 amostras não degradam em demasiado a experiência do usuário. Ou seja, embora redes confiáveis de alta velocidade sejam desejáveis para este tipo de aplicação, o experimento indica que atrasos de algumas amostras e até mesmo perda eventual de pacotes não inviabiliza o uso do andador.

4 Conclusões e Trabalhos Futuros

Este trabalho apresenta um estudo acerca da migração de um andador inteligente usual, onde toda a computação é realizada localmente, para um sistema cyber-físico em nuvem, onde algoritmos computacionais podem ser executados remotamente. Foi realizado um estudo sobre como essa mudança de paradigma pode potencializar as capacidades de um andador inteligente, assim como foi apresentado um estudo de caso experimental onde a latência da comunicação entre dispositivo e plataforma remota foi simulada e teve seus efeitos avaliados no uso do UFES *Smart Walker*.

Os experimentos realizados indicam que a latência na rede de comunicação entre andador e plataforma de computação remota degrada significativamente a experiência do usuário e pode inviabilizar seu uso por parte de pessoas com transtornos de mobilidade, tanto por uma questão de preferência pessoal quanto por uma questão de segurança. Também indica que fatores como perda e desordem de pacotes, apesar de não se mostrarem preponderantes nas métricas utilizadas, não deveriam ser ignoradas neste tipo de sistema.

A migração de paradigma abordada neste trabalho pode permitir grande ampliação nas capacidades de um andador robótico. Algoritmos mais poderosos podem ser aplicados em *hardware* menos potente, que se limitaria à aquisição de sinais dos sensores, comunicação e execução dos comandos dos motores de tração. Estratégias de controle misto também podem ser empregadas, mantendo a utilização local de algoritmos simples nos momentos de piora ou falha na comunicação. Desta

forma, este primeiro trabalho relacionado com a construção de estratégias de controle e navegação para andadores robóticos baseados em sistemas cyber-físicos em nuvem abre uma série de novas possibilidades de estudos e trabalhos futuros a serem abordados pelo pesquisadores.

Agradecimentos

Esta pesquisa é financiada pelas agências CAPES (88887.095626/2015-01), FAPES (67566480 & 72982608) e CNPq (304192/2016-3). Este projeto é financiado pela iniciativa H2020 da União Europeia para pesquisa, desenvolvimento tecnológico e demonstrações sob o acordo de concessão no. 688941 (FUTEBOL), bem como pelo Ministério de Ciência, Tecnologia, Inovação e Comunicação do Brasil através da RNP e do CTIC.

Referências

- Cifuentes, C. A., Rodriguez, C., Frizzera-Neto, A., Bastos-Filho, T. F. and Carelli, R. (2016). Multimodal HumanRobot Interaction for Walker-Assisted Gait, *IEEE Systems Journal* **10**(3): 933–943.
- Cifuentes, C., Rodriguez, C., Frizzera, A. and Bastos, T. (2014). Sensor fusion to control a robotic walker based on upper-limbs reaction forces and gait kinematics, *Proceedings of the IEEE RAS and EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechanics*, pp. 1098–1103.
- Elias, A., Frizzera, A., Bastos, T. F. and Valadao, C. (2012). Robotic walkers from a clinical point of view: Feature-based classification and proposal of the UFES Walker, *2012 ISSNIP Biosignals and Biorobotics Conference: Biosignals and Robotics for Better and Safer Living, BRC 2012*.
- Frizzera Neto, A., Gallego, J. a., Rocon, E., Pons, J. L. and Ceres, R. (2010). Extraction of user’s navigation commands from upper body force interaction in walker assisted gait., *Biomedical engineering online* **9**: 37.
- Goldberg, K. and Kehoe, B. (2013). Cloud Robotics and Automation:A Survey of Related Work, ... *Tech. Rep. UCB/EECS-2013-5* pp. 1–12.
- International Telecommunication Union (1996). P.800: Methods for subjective determination of transmission quality, *ITU-T Recommendation* **800**.
- Jordán, S., Haidegger, T., Kovács, L., Felde, I. and Rudas, I. (2013). The rising prospects of cloud robotic applications, *ICCC 2013 - IEEE 9th International Conference on Computational Cybernetics, Proceedings*, pp. 327–332.
- Kehoe, B., Patil, S., Abbeel, P. and Goldberg, K. (2015). A survey of research on cloud robotics and automation, *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering* **12**(2): 398–409.
- Kulyukin, V., Kutiyawala, A., LoPresti, E., Matthews, J. and Simpson, R. (2008). IWalker: Toward a rollator-mounted wayfinding system for the elderly, *2008 IEEE International Conference on RFID (Frequency Identification), IEEE RFID 2008* **60**: 303–311.
- Rajkumar, R., Lee, I. L. I., Sha, L. S. L. and Stankovic, J. (2010). Cyber-physical systems: The next computing revolution, *Design Automation Conference (DAC), 2010 47th ACM/IEEE*, pp. 0–5.
- Rodriguez, C., Cifuentes, C., Frizzera, A. and Bastos, T. (2013). Metodologia para Obtenção de Comandos de Navegação de um Andador Robótico Através de Sensores de Força e Laser, *XI Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente (SBAI), 2013* pp. 1–6.
- Valadao, C., Caldeira, E., Bastos-Filho, T., Frizzera-Neto, A. and Carelli, R. (2016). A new controller for a smart walker based on human-robot formation, *Sensors (Switzerland)* **16**(7): 1–26.
- Wan, J., Tang, S., Yan, H., Li, D., Wang, S. and Vasilakos, A. V. (2016). Cloud robotics: Current status and open issues, *IEEE Access* **4**: 2797–2807.
- Yoshikane, N., Sato, T., Isaji, Y., Shao, C., Marco, T., Okamoto, S., Miyazawa, T. and Ohshima, T. (2016). First Demonstration of Geographically Unconstrained Control of an Industrial Robot by Jointly Employing SDN-based Optical Transport Networks and Edge Compute, *Optoelectronics and Communications Conference (OECC)* **1**(c): 1–3.
- Zhang, L., Gao, H. and Kaynak, O. (2013). Network-induced constraints in networked control systems-A survey, *IEEE Transactions on Industrial Informatics* **9**(1): 403–416.