



SOFTWARE DE ANÁLISE DE MOVIMENTO BASEADO EM IA PARA AVALIAÇÃO DE ESPORTE E FISIOTERAPIA

AI BASED MOTION ANALYSIS SOFTWARE FOR SPORT AND PHYSICAL THERAPY ASSESSMENT

SOFTWARE DE ANÁLISIS DE MOVIMIENTO BASADO EN IA PARA LA EVALUACIÓN DEL DEPORTE Y LA FISIOTERAPIA

Fanni Zsarnoczky-Dulhazi¹ 
(Fisioterapeuta e Especialista em Reabilitação)

Solt Agod² 
(Engenheiro de Software)

Steve Szarka³ 
(Médico)

Kornelia Tuza⁴ 
(Fisioterapeuta)

Bence Kopper⁵ 
(Biomecânica e Bioestatística)

1. Hungarian University of Sports Science, Escola de Estudos de Doutorado, Budapeste, Hungria.

2. Machine Intelligence Ltd, Szokolya, Hungria.

3. McMaster University, Ontario, Hamilton, Canada.

4. Hungarian University of Sports Science, Departamento de Fisioterapia, Budapeste, Hungria.

5. Hungarian University of Sports Science, Departamento de Kinesiologia, Budapeste, Hungria.

Correspondência:

Fanni Zsarnoczky-Dulhazi
Hungarian University of Sports Science, 42-48 Alkotás Street, Budapeste, Hungria. 1123.
dulhazifanni@gmail.com

RESUMO

Introdução: Como a Organização Mundial da Saúde declarou o novo coronavírus como pandemia em março de 2020, a fisioterapia é mais difícil de executar, o distanciamento social é obrigatório no setor de saúde. **Objetivo:** Na prática da fisioterapia, um software de análise de vídeo online que fornece informações gráficas e numéricas em tempo real sobre as execuções de movimento do paciente sem contato pessoal direto significaria uma melhora significativa no tratamento eHealth. **Métodos:** Desenvolveu-se uma camada de software em cima do software de estimativa de posição do corpo humano OpenPose que pode extrair as séries temporais de ângulos de partes do corpo arbitrarias usando as coordenadas de saída do OpenPose processando os dados gravados por duas câmeras simultaneamente. Para validar o procedimento de determinação dos ângulos articulares utilizando o software Openpose utilizou-se o software Kinovea. **Resultados:** A comparação do ângulo máximo do joelho determinado em nosso e no software Kinovea, amplamente utilizado em medidas biomecânicas, não foi significativamente diferente ($2,03 \pm 1,06^\circ$, $p < 0,05$) **Conclusão:** Isso indica que o software desenvolvido pode calcular os ângulos articulares adequados com a precisão que os tratamentos de fisioterapia exigem. Como esse software ainda não existe, com a ajuda do desenvolvimento desse software, os terapeutas puderam controlar e corrigir os exercícios em tempo real, e também à distância, aumentando a eficácia da fisioterapia. **Nível de Evidência II; Experimental, comparativo.**

Descritores: Inteligência Artificial; Redes Neurais Computacionais; eSaúde; Medicina Física e Reabilitação; Distanciamento Social.

ABSTRACT

Introduction: As the World Health Organization declared the novel coronavirus as a pandemic in March 2020, physical therapy is more difficult to execute, and social distancing is mandatory in the healthcare sector. **Objective:** In physical therapy, an online video analysis software that provides real-time graphic and numerical information about the patient's movement executions without direct personal contact would mean a significant improvement in eHealth treatment. **Methods:** We have developed a software layer on top of OpenPose human body position estimation software that can extract the time series of angles of arbitrary body parts using the output coordinates from OpenPose processing the data recorded by two cameras simultaneously. To validate the procedure of determining the joint angles using the Openpose software we have used the Kinovea software. **Results:** The comparison of the determined maximal knee angle in our and the Kinovea software, which is widely used in biomechanical measurements, was not significantly different ($2.03 \pm 1.06^\circ$, $p < 0.05$) **Conclusion:** This indicates, that the developed software can calculate the appropriate joint angles with the accuracy that physiotherapy treatments require. As, to our knowledge no such software yet exists, with the help of this software development, therapists could control and correct the exercises in real-time, and also from a distance, and physical therapy effectiveness could be increased. **Level of Evidence II; Experimental, comparative.**

Keywords: Artificial Intelligence; Computational Neural Networks; eHealth; Physical and Rehabilitation Medicine; Social Distancing.

RESUMEN

Introducción: Como la Organización Mundial de la Salud declaró el nuevo coronavirus como una pandemia en marzo de 2020, la fisioterapia es más difícil de ejecutar, el distanciamiento social es obligatorio en el sector de la salud. **Objetivo:** En la práctica de fisioterapia un software de análisis de vídeo online que proporcione información gráfica y numérica en tiempo real sobre las ejecuciones de movimiento del paciente sin contacto personal directo supondría una mejora significativa en el tratamiento de la eSalud. **Métodos:** Fue desarrollado una capa de software sobre el software de estimación de posición del cuerpo humano OpenPose que puede extraer la serie temporal de ángulos de partes arbitrarias del cuerpo utilizando las coordenadas de salida de OpenPose procesando los datos registrados por dos cámaras simultáneamente. Para validar el procedimiento de determinación de los ángulos articulares mediante el software Openpose fue utilizado el software Kinovea. **Resultados:** La comparación del ángulo máximo de rodilla



determinado en nuestro software y Kinovea, que es ampliamente utilizado en mediciones biomecánicas, no fue significativamente diferente ($2,03 \pm 1,06^\circ$, $p < 0,05$) Conclusión: Esto indica que el software desarrollado puede calcular los ángulos articulares adecuados con la precisión que requieren los tratamientos de fisioterapia. Dado que aún no existe dicho software, con la ayuda de este desarrollo de software, los terapeutas podrían controlar y corregir los ejercicios en tiempo real, y también a distancia, y se podría aumentar la eficacia de la fisioterapia.

Nivel de Evidencia II; Experimental, comparativo.

Descriptor: Inteligencia Artificial; Redes Neuronales Computacionales; eSalud; Medicina Física y Rehabilitación; Distanciamiento social.

DOI: http://dx.doi.org/10.1590/1517-8692202430012022_0020p

Artigo recebido em 26/01/2022 aprovado em 23/01/2023

INTRODUÇÃO

A Organização Mundial da Saúde declarou o novo coronavírus, proveniente de Wuhan, na China, como uma pandemia em 11 de março de 2020, e a doença ainda está se espalhando.¹ A situação de pandemia da COVID-19 provocou mudanças significativas em todos os setores da sociedade, inclusive no setor de saúde. Neste, a situação é desafiadora, embora o relacionamento entre pacientes e profissionais de saúde já estivesse mudando antes da pandemia. Nas últimas três décadas, o contato pessoal direto era predominantemente entre um tomador de decisões ativo (médico) e um seguidor passivo (paciente). Essa abordagem paternalista foi transformada em um modelo de orientação e cooperação e, com o passar dos anos, em um modelo centrado no paciente. O aumento do uso da Internet foi um dos fatores que afetaram essa mudança.² O papel do autocuidado e da participação ativa dos pacientes em seu processo de reabilitação está aumentando, e a cooperação mútua entre paciente e médico, a comunicação mais simples, porém direta, e a abordagem complexa caracterizam a assistência médica no mundo digitalizado. É preciso encontrar soluções alternativas para um novo tipo de atendimento médico-paciente à distância, já que o número de contatos pessoais diminuiu drasticamente como resultado da norma de distanciamento social induzida pela COVID-19. Além disso, antes do novo coronavírus, outros vírus já haviam ameaçado uma pandemia: SARS, H1N1, Influenza A, MERS, etc. Isso ilustra que haverá cada vez mais doenças às quais os fisioterapeutas e os profissionais de saúde precisarão se adaptar.³ Consequentemente, a implementação da reabilitação domiciliar e, especificamente, dos métodos de telessaúde tornaram-se essenciais para a continuidade dos programas de reabilitação, especialmente no caso de pacientes com necessidades de reabilitação ambulatorial.⁴ Como o uso da telessaúde não é uma abordagem nova na área da saúde,⁵ a ideia de usá-la na fisioterapia também não é.⁶ O aproveitamento do potencial das inovações recentes, como aplicativos de saúde para *smartphones*, *laptops*, *iPads* etc., para a saúde do paciente, estilo de vida saudável e atividade física é amplamente suportado.^{7,8}

Atualmente, os fisioterapeutas podem usar vários tipos de equipamentos e técnicas de análise de movimento para verificar as condições dos pacientes, como goniômetro, dinamômetro, EMG, sistemas de análise de marcha, dispositivos de estabilometria, placa de força, etc. Vários sistemas baseados em captura de movimento estão sendo usados principalmente em esportes, como tecnologia de análise de vídeo com marcadores reflexivos (Vicon, Qualisys, etc.), que fornecem dados contínuos sobre os parâmetros cinemáticos e cinéticos vitais dos indivíduos: movimento, velocidade, aceleração, força, potência.⁹ Atualmente, os sistemas de análise de captura de movimento sem marcadores representam uma categoria separada entre os dispositivos de análise de movimento. Suas vantagens incluem o fato de que o tempo de preparação da medição é mínimo, os sistemas podem ser usados em casa, não impedem o movimento e são quase tão precisos quanto se a captura de movimento tivesse sido feita com o uso de marcadores.¹⁰ Provavelmente, o mais conhecido é o Microsoft Kinect, que foi criado principalmente para videogames. Ele inclui uma câmera

de vídeo, um sensor de profundidade e um microfone multiarray, sensores destinados a classificar diferentes movimentos corporais.¹¹ Vários autores afirmam que o Kinect é útil com ou sem outras tecnologias para a fisioterapia musculoesquelética remota. Por exemplo, o sensor Kinect com uma braçadeira, inserido com o chip IMU, que pode calcular a força geográfica, pode fornecer uma varredura precisa das atividades do paciente durante as sessões de fisioterapia musculoesquelética.¹² O Kinect como ferramenta de reabilitação foi testado com resultados positivos em pacientes com doença de Parkinson.¹³ pacientes com leucodistrofia metacromática (MLD);¹⁴ pacientes com paralisia cerebral (PC);¹⁵ pacientes com AVC;¹⁶ e em caso de treinamento específico, como treinamento de equilíbrio¹⁷ e treinamento de reabilitação de membros superiores, que inclui movimentos das mãos e dos dedos.¹⁸ Além disso, o Kinect pode ser capaz de prevenir lesões musculoesqueléticas por meio da realização de avaliações ergonômicas no local de trabalho.¹⁹ Outro sistema de análise de movimento amplamente conhecido é o Kinovea. Ele foi criado especificamente para analisar movimentos esportivos,²⁰ mas é uma ferramenta indiscutivelmente útil também para fins de reabilitação, por exemplo, análise da marcha,²¹ medição da cinemática da articulação do punho²² ou análise da amplitude de movimento da coluna cervical no plano sagital.²³

Recentemente, o uso da Inteligência Artificial (IA) é um dos campos mais pesquisados nas tecnologias de análise de movimento relacionadas à saúde. Uma forma de IA é chamada de aprendizado de máquina (AM), em que os algoritmos fazem previsões para interpretar dados e "aprender" sem instruções estáticas do programa.²⁴ É evidente que a IA tem vários avanços e oportunidades: tempo e custo-benefício e, com o AM, os diagnósticos, a tomada de decisões e a aferição tornam-se mais simples, o que pode resultar em um melhor atendimento ao paciente. O uso do AM para imagens médicas, previsão do fenótipo da dor, tecnologia vestível, previsão de risco e suporte à decisão em doenças e condições musculoesqueléticas pode ser mais eficaz.²⁵

O OpenPose pode ser identificado como a próxima geração das ferramentas existentes de análise de movimento sem marcadores para reabilitação musculoesquelética, pois utiliza IA. O OpenPose é um software de estimativa postural de última geração, com licença acadêmica gratuita e em tempo real, baseado em Redes Neurais Convolucionais (RNCs), que pode localizar pontos-chave anatômicos em seres humanos. Ele foi desenvolvido por pesquisadores da Carnegie Mellon University, que coletaram grandes quantidades de dados de pessoas em várias posturas usando o Panoptic Studio.²⁶ Na literatura científica, a precisão do software OpenPose foi pré-validada e provou ser útil para a análise da marcha.²⁷

O objetivo foi criar e testar uma nova solução para fisioterapia musculoesquelética com base no software OpenPose que pode reformar a reabilitação remota. Acredita-se que um sistema de análise de vídeo *on-line* acessível, composto por componentes de *commodities*, que forneça informações gráficas e numéricas em tempo real sobre os movimentos do paciente sem contato direto entre o terapeuta e o paciente durante o processo de reabilitação, seria altamente benéfico principalmente em situações especiais, como a pandemia da COVID-19.

MATERIAIS E MÉTODOS

Disponibilidade do código

Criou-se um servidor próprio, executável na linguagem de programação *python*, a partir do código-fonte do OpenPose (github.com/openpose), executado em computador local. Por meio da API (Interface de Programação de Aplicativos) desse servidor, pode-se obter as coordenadas detectadas das articulações. O software chama o servidor OpenPose em tempo real com as imagens da câmera e, em seguida, calcula os ângulos selecionados a partir dos valores retornados. Aprovado pelo comitê de ética sob o código: TE-KEB/07/2023.

O modelo é implementado no programa de computador OpenPose (mas pode ser integrado a qualquer outro software disponível comercialmente, que funcione da mesma forma que o Openpose), que recebe uma imagem colorida ou um fluxo de vídeo e produz, como saída, os seguintes pontos-chave do corpo humano: Nariz, pescoço; lado direito: Ombro, cotovelo, pulso, quadril, joelho, tornozelo, olho, orelha, halux, calcanhar, quinto dedo do pé; meio do quadril; lado esquerdo: Ombro, cotovelo, pulso, quadril, joelho, tornozelo, olho, orelha, halux, calcanhar, quinto dedo do pé (para obter mais informações sobre código e rastreamento de pontos-chave: github.com/openpose). Embora o OpenPose possa determinar a localização desses pontos-chave, para determinar se o paciente segue os exercícios prescritos corretamente, desenvolveu-se uma camada de software sobre o OpenPose que pode extrair a série temporal de ângulos de partes arbitrárias do corpo, usando as coordenadas de saída do OpenPose. Usou-se a linguagem Python (www.python.org) para gerar um código básico para determinar os ângulos das articulações com base nas coordenadas adquiridas da camada Openpose que está sendo aplicada em registro de movimento de agachamento. Para obter o ângulo de articulação necessário, foram

usados cálculos trigonométricos básicos. Como o Openpose determinou as coordenadas relativas x_i, y_i para as posições necessárias dos pontos de articulação A, B e C (Figura 1), calculou-se $\text{tg}\alpha_{AB} = (y_A - y_B) / (x_A - x_B)$ e $\text{tg}\alpha_{CB} = (y_C - y_B) / (x_C - x_B)$ para cada quadro individual, respectivamente. Em seguida, $\alpha_{AB} + \alpha_{CB}$ foi calculado e visualizado na tela quantitativamente como o ângulo articular definitivo do joelho para cada quadro.

Um problema definitivo dos sistemas de análise de movimento baratos ou gratuitos é o uso de apenas uma câmera. Consequentemente, as informações disponíveis sobre o movimento do indivíduo só podem processar informações adquiridas de um plano do movimento. Existem sistemas de análise de movimento em 3D, como VICON, Qualysis etc., mas esses sistemas são muito caros, a fixação de marcadores é necessária para o indivíduo, também são necessários técnicos de apoio e eles não se destinam ao uso doméstico. Para lidar com as restrições das imagens de câmera 2D, desenvolveu-se o sistema para processar simultaneamente os dados fornecidos por duas câmeras. Consequentemente, embora o sistema use apenas imagens visuais 2D, a observação do movimento do paciente pode ser obtida para o plano frontal e sagital de forma independente (Figura 2). Como o procedimento é suscetível ao posicionamento adequado do corpo, uma vez que um sinal conjunto positivo-negativo da subtração de coordenadas pode levar a resultados incorretos, a execução do agachamento deve ser feita de forma que o participante vire com o lado esquerdo para a câmera enquanto executa o agachamento no plano sagital para uma câmera e no plano frontal para a outra.

Validação

Para validar o procedimento de determinação do ângulo da articulação do joelho usando o software Openpose, utilizou-se o software Kinovea, que é amplamente aceito no campo da reabilitação e da análise do movimento humano.²⁸ Três coautores executaram 10-10, um total de 30 agachamentos, que foram gravados por câmera. Depois disso, determinou-se os ângulos do joelho para a posição mais profunda do corpo e a flexão máxima do joelho para cada agachamento com o OpenPose e também com o software Kinovea (Figura 3). Para o protocolo de validação adequado do procedimento Openpose, subtraiu-se os pares correspondentes dos dois conjuntos de dados e, em seguida, executou-se um cálculo de teste t unidirecional de amostra única (StatSoft Statistica 12) com o valor-alvo de zero (com base no procedimento de validação Altman-Bland) para determinar se o desvio de zero para as diferenças dos dois procedimentos que determinam os ângulos do joelho é significativo.

RESULTADOS

Os resultados indicam que não houve diferença estatística significativa nos valores subtraídos do ângulo da articulação do joelho do

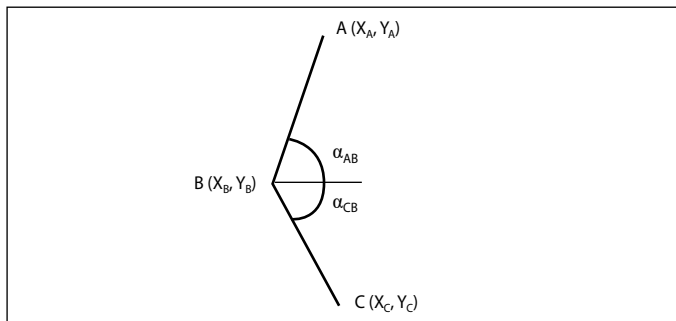


Figura 1. Representação do ângulo da articulação do joelho usando as coordenadas x_i, y_i relativas do Openpose para os pontos-chave A, B, C como localizações anatômicas das articulações do quadril, joelho e tornozelo, respectivamente.

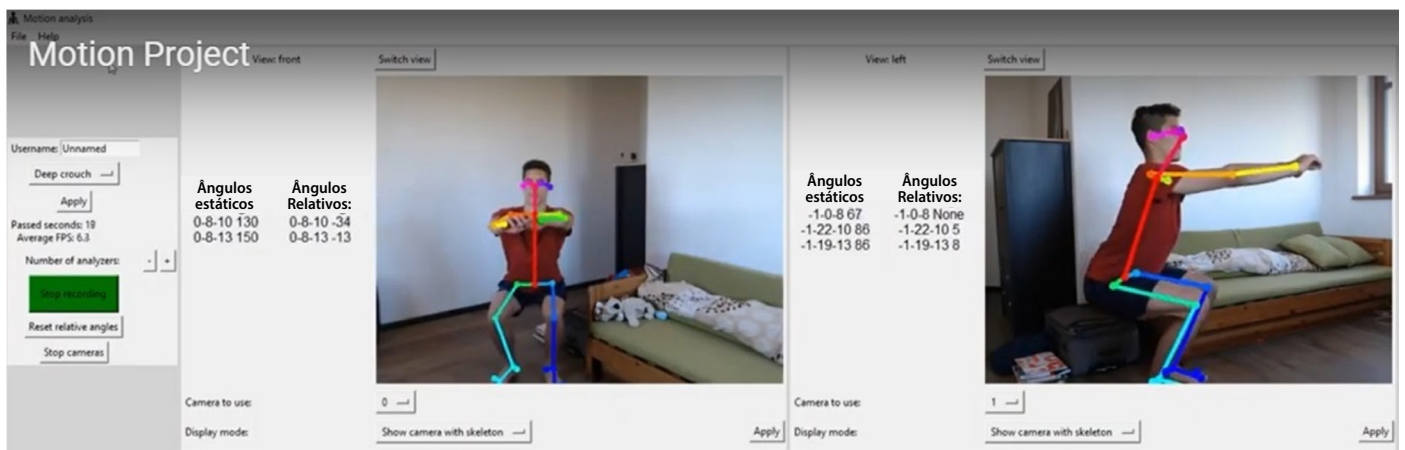


Figura 2. Imagem representativa mostrando o software em execução. O software foi desenvolvido para processar os dados fornecidos por duas câmeras simultaneamente. Consequentemente, embora o sistema use apenas imagens visuais em 2D, a observação do movimento do paciente pode ser feita para o plano frontal e sagital de forma independente.

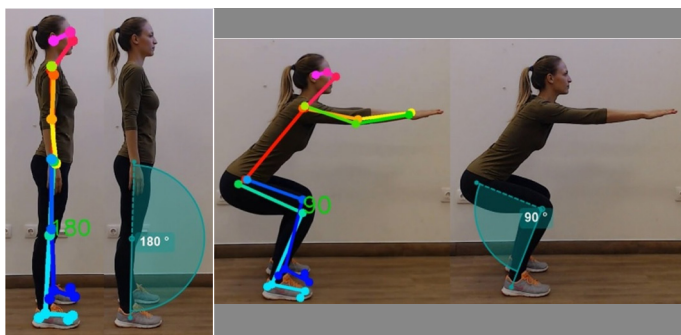


Figura 3. Imagem representativa indicando o ângulo do joelho determinado para o quadro idêntico com o Openpose (esquerda) e o Kinovea (direita) para comparação posterior e validação do procedimento baseado no Openpose para calcular os ângulos das articulações.

Openpose-Kinovea ($Ave=0,33\pm 2,29^\circ$) em relação ao valor-alvo zero após a realização de um teste t unidirecional de amostra única ($p<0,05$), indicando que o procedimento de determinação dos ângulos do joelho usando o software OpenPose não é significativamente diferente dos ângulos determinados da articulação do joelho usando o Kinovea e, portanto, esses ângulos do joelho devem ser aceitos. Embora a comparação tenha indicado que não houve diferença significativa nos dados do Openpose e do Kinovea, as diferenças absolutas foram calculadas: $2,03\pm 1,06^\circ$ e as porcentagens de diferenças entre os pares de dados: $2,28\pm 1,18\%$.

Limitações

Para validar de forma mais completa o procedimento de uso do OpenPose na determinação dos ângulos das articulações humanas, protocolos de validação mais complexos devem ser executados usando vários sistemas de análise de movimento amplamente aceitos.

DISCUSSÃO

Como o sistema de saúde foi reestruturado por causa da COVID-19, as reuniões de contato direto dos pacientes com os profissionais de saúde foram radicalmente reduzidas para retardar e diminuir a propagação do vírus. Este é o momento perfeito para explorar as oportunidades oferecidas pelos desenvolvimentos tecnológicos on-line que podem aumentar a eficiência do setor de saúde, já que o número de usuários ativos da Internet atualmente é de mais de 4,6 bilhões (59,5% da população global) no mundo, incluindo o número de usuários ativos da Internet móvel que é de 4,32 bilhões.²⁹ Para manter as sessões de fisioterapia, as soluções com conexão de vídeo *on-line* podem ser uma solução no futuro, pois sabe-se que o *feedback* visual contínuo sobre a execução do movimento é essencial para os pacientes em fisioterapia.³⁰ Várias pesquisas anteriores tratam da assistência tecnológica à medicina.^{14-18,22,23} Uma dessas áreas é o uso em potencial da inteligência artificial e do aprendizado de máquina para a detecção e avaliação da postura de pacientes com problemas musculoesqueléticos.²⁴ Este software e sistema de câmera baseados no OpenPose possibilitam uma oportunidade de tratamento remoto que oferece não apenas *feedback* visual em tempo real, mas também

numérico preciso sobre a posição real do corpo do paciente, usando os benefícios proporcionados pela tecnologia de IA e AM. De acordo com os resultados, não houve diferença estatística significativa nos valores subtraídos do ângulo da articulação do joelho Openpose-Kinovea durante o agachamento, o que significa que o software é capaz de fornecer dados numéricos precisos do movimento. Além disso, o sistema proposto usa componentes econômicos e de fácil acesso, e sua aplicação está em total conformidade com as normas atuais de distanciamento social. Com o processamento de duas imagens de câmera independentes que registram simultaneamente o movimento do participante no plano frontal e sagital, pode-se abordar parcialmente as restrições dos sistemas gratuitos ou baratos atualmente disponíveis que usam uma imagem de câmera. Acredita-se que, durante o processo de reabilitação, o software baseado no OpenPose pode ser usado de pelo menos duas maneiras diferentes. Primeiro, os especialistas em reabilitação podem obter *feedback* em vídeo em tempo real sobre como seus pacientes realizam as tarefas de exercícios em casa e corrigi-los, ensiná-los e incentivá-los a obter os resultados mais positivos. A segunda aplicação possível é medir com facilidade e precisão o progresso quantitativo do tratamento de reabilitação, comparando os dados de amplitude de movimento nos vídeos gravados sequencialmente. Portanto, a supervisão longitudinal do programa de reabilitação dos pacientes pode ser executada à distância, com base nos dados medidos. E, embora procedimentos de validação mais completos e precisos devam ser executados para a aprovação do procedimento, o desvio do protocolo de validação entre o Kinovea e o OpenPose no campo da fisioterapia pode ser considerado mínimo.

CONCLUSÃO

Para resumir o artigo, em casos especiais, como a pandemia da COVID-19, seria altamente benéfico combinar as necessidades da sociedade e a facilidade de uso da tecnologia acessível. Pode-se concluir que o software suplementado tem várias vantagens em comparação com os sistemas de apoio à reabilitação musculoesquelética usados atualmente: ele é rápido e fácil de usar, pode ser usado sem contato pessoal direto entre médico/fisioterapeuta e paciente e é muito mais barato do que outros sistemas de análise de movimento de alta qualidade. Acredita-se que, pelo fato de ainda não existir nenhum software que use dados em tempo real e também processe duas imagens de câmera independentes simultaneamente, ao explorar as vantagens da tecnologia apresentada, a eficácia da fisioterapia pode ser aumentada e os serviços de tratamento remoto estarão mais amplamente disponíveis no futuro, mesmo após a aprovação da COVID-19.

Esta pesquisa não recebeu nenhum subsídio específico de agências de financiamento dos setores públicos, comerciais ou sem fins lucrativos.

Todos os autores declararam não haver qualquer potencial conflito de interesses referente a este artigo.

CONTRIBUIÇÃO DOS AUTORES: Cada autor fez contribuições individuais significativas para este manuscrito. FZSD: conceito, redação, revisão e realização da medição, análise estatística; AS: desenvolvimento do software, redação; SSZ: revisão crítica do manuscrito; KT: redação, realização da medição; BK: análise estatística, aprovação final da versão do manuscrito.

REFERÊNCIAS

- World Health Organization. Director-General's opening remarks at the media briefing on COVID-19 - 11 March 2020 [Internet]. 2020 [Access on 2021 Jan 20]. Disponível em: <https://www.who.int/director-general/speeches/detail/who-director-general-s-opening-remarks-at-the-media-briefing-on-covid-19--11-march-2020>.
- Kaba R, Sooriakumaran P. The evolution of the doctor-patient relationship. *Int J Surg*. 2007;5(1):57-65.
- Landry MD, Geddes L, Moseman AP, Lefler JP, Raman SR, Wijchen J. Early reflection on the global impact of COVID19, and implications for physiotherapy. *Physiother*. 2020;107:A1-3.
- Lew HL, Oh-Park M, Cifu DX. The War on COVID-19 Pandemic: Role of Rehabilitation Professionals and Hospitals. *Am J Phys Med Rehabil*. 2020;99(7):571-2.
- Jin K, Khonsari S, Gallagher R, Gallagher P, Clark AM, Freedman B, et al. Telehealth interventions for the secondary prevention of coronary heart disease: A systematic review and meta-analysis. *Eur J Cardiovasc Nurs*. 2019;18(4):260-71. doi:10.1177/1474515119826510.
- Holland AE. Telephysiotherapy: time to get online. *J Physiother*. 2017;63(4):193-5. doi:10.1016/j.jphys.
- Ramey L, Osborne C, Kasinton D, Juengst S. Apps and Mobile Health Technology in Rehabilitation: The Good, the Bad, and the Unknown. *Phys Med Rehabil Clin N Am*. 2019;30(2):485-97. doi:10.1016/j.pmr.2018.12.001.
- Moral-Munoz JA, Zhang W, Cobo MJ, Herrera-Viedma E, Kaber DB. Smartphone-based systems for

- physical rehabilitation applications: A systematic review. *Assist Technol.* 2021;33(4):223-36. doi:10.1080/10400435.2019.1611676.
9. Hurley OA. Part I/2. Types of Technology Commonly used in Sport. In: *Sport Cyberpsychology*. Abingdon: Routledge; 2018.
 10. Colyer SL, Evans M, Cosker DP, Salo AIT. A Review of the Evolution of Vision-Based Motion Analysis and the Integration of Advanced Computer Vision Methods Towards Developing a Markerless System. *Sports Med Open.* 2018;5(4):24. doi:10.1186/s40798-018-0139-y.
 11. Saputra MRU, Widyawan W, Putra GD, Santosa PI. Indoor human tracking application using multiple depth-cameras. 4th International Conference on Advanced Computer Science and Information Systems; 2012, Depok, Indonesia. p. 307-12.
 12. Durve I, Ghuge S, Patil S, Kalbande D. Machine Learning Approach for Physiotherapy Assessment. 2019 International Conference on Advances in Computing, Communication and Control (ICAC3); 2019. p. 1-5. doi:10.1109/icac347590.2019.90367.
 13. Galna B, Jackson D, Schofield G, McNaney R, Webster M, Barry G, et al. Retraining function in people with Parkinson's disease using the Microsoft Kinect: game design and pilot testing. *J Neuroeng Rehabil.* 2014;11:60. doi:10.1186/1743-0003-11-60.
 14. Ulaşlı AM, Türkmen U, Toktaş H, Solak O. The complementary role of the Kinect virtual reality game training in a patient with metachromatic leukodystrophy. *PM R.* 2014;6(6):564-7. doi:10.1016/j.pmrj.2013.11.010.
 15. Chang YJ, Han WY, Tsai YC. A Kinect-based upper limb rehabilitation system to assist people with cerebral palsy. *Res Dev Disabil.* 2013;34(11):3654-9. doi:10.1016/j.ridd.2013.08.021.
 16. Ikbali Afsar S, Mirzayev I, Yemisci OU, Cosar Saracgil SN. Virtual Reality in Upper Extremity Rehabilitation of Stroke Patients: A Randomized Controlled Trial. *J Stroke Cerebrovasc Dis.* 2018;27(12):3473-8. doi:10.1016/j.jstrokecerebrovasdis.2018.08.007.
 17. Lange B, Chien-Yen C, Suma E, Newman B, Rizzo AS, Bolas M. Development and evaluation of low cost game-based balance rehabilitation tool using the microsoft kinect sensor. *Annu Int Conf IEEE Eng Med Biol Soc.* 2011;2011:1831-4. doi:10.1109/iembs.2011.6090521.
 18. Metcalf CD, Robinson R, Malpass AJ, Bogle TP, Dell TA, Harris C, et al. Markerless Motion Capture and Measurement of Hand Kinematics: Validation and Application to Home-Based Upper Limb Rehabilitation. *IEEE Trans Biomed Eng.* 2013;60(8):2184-92. doi:10.1109/tbme.2013.2250286.
 19. Dutta T. Evaluation of the Kinect™ sensor for 3-D kinematic measurement in the workplace. *Appl Ergon.* 2012;43(4):645-9. doi:10.1016/j.apergo.2011.09.011.
 20. Nor Adnan NM, Ab Patar MNA, Lee H, Yamamoto SI, Jong-Young L, Mahmud J. Bio-mechanical analysis using Kinovea for sports application. *IOP Conf Ser Mater Sci Eng.* 2018;342:012097. doi:10.1088/1757-899X/342/1/012097.
 21. Fernández-González P, Koutsou A, Cuesta-Gómez A, Carratalá-Tejada M, Miangolarra-Page JC, Molina-Rueda F. Reliability of Kinovea® Software and Agreement with a Three-Dimensional Motion System for Gait Analysis in Healthy Subjects. *Sensors (Basel).* 2020;20(11):3154. doi:10.3390/s20113154.
 22. El-Raheem RMA, Kamel RM, Ali MF. Reliability of using Kinovea program in measuring dominant wrist joint range of motion. *Trends Appl Sci Res.* 2015;10(4):224-30.
 23. Elwardany SH, El-Sayed WH, Ali MF. Reliability of Kinovea computer program in measuring cervical range of motion in sagittal plane. *Open Access Libr. J.* 2015;2(9):e1916.
 24. Tack C. Artificial intelligence and machine learning | applications in musculoskeletal physiotherapy. *Musculoskelet Sci Pract.* 2019;39:164-9. doi:10.1016/j.msksp.2018.11.012
 25. Joo H, Liu H, Tan L, Gui L, Nabbe B, Matthews I, et al. The Panoptic Studio: A Massively Multiview System for Social Motion Capture (in ICCV 2015). [Internet]. 2015 [cited on 2020 Dec 2]. Available at: <https://www.cs.cmu.edu/~hanbyulj/panoptic-studio/>.
 26. Kidziński L, Yang B, Lee Hicks J, Rajagopal A, Delp SL, Schwartz MH, et al. Deep neural networks enable quantitative movement analysis using single-camera videos. *Nat Commun.* 2020;11(1):4054. doi:10.1038/s41467-020-17807-z.
 27. Cao Z, Hidalgo G, Simon T, Wei SE, Sheikh Y. OpenPose: Realtime Multi-Person 2D Pose Estimation Using Part Affinity Fields. *IEEE Trans Pattern Anal Mach Intell.* 2021;43(1):172-86. doi:10.1109/TPAMI.2019.2929257.
 28. Dalal KK, Joshua AM, Nayak A, Mithra P, Misri Z, Unnikrishnan B. Effectiveness of prowling with proprioceptive training on knee hyperextension among stroke subjects using videographic observation- a randomised controlled trial. *Gait Posture.* 2018;61:232-7.
 29. Statista. Global digital population as of January 2021 [Internet]. 2021 [Access on 2021 Dec 10]. Disponível em: <https://www.statista.com/statistics/617136/digital-population-worldwide/>.
 30. Kim HJ, Kramer JF. Effectiveness of Visual Feedback During Isokinetic Exercise. *J Orthop Sports Phys Ther.* 1997;26(6):318-23. doi:10.2519/jospt.1997.26.6.318.