

## GONIOMETRIA BASEADA EM SENSORES INERCIAIS NA ANÁLISE DOS MOVIMENTOS DA COLUNA CERVICAL

R.R. Caldas, Itúrbide F.A.S., K.M. Carvalho, F. Buarque L.N. e Diego Rativa

Escola Politécnica de Pernambuco, Universidade de Pernambuco, Recife, Brasil

e-mail: rc88rafael@gmail.com, diego.rativa@poli.br

**Resumo:** A avaliação da mobilidade da coluna cervical proporciona informações acerca de doenças relacionadas às disfunções articulares. Atualmente, as técnicas mais difundidas são de alto custo e de difícil implementação nas clínicas de pequeno e médio porte, ou quando não, apresentam resultados contrastantes, o que compromete sua confiabilidade. Neste trabalho, propusemos um sistema baseado em sensores inerciais para auxiliar a avaliação física, na mensuração das amplitudes de movimento (ADM) da coluna cervical. O sistema proposto é composto por dois sensores inerciais conectados a um microprocessador *Arduino*. Os experimentos compreenderam medidas simultâneas do sistema e do goniômetro manual para cada movimento, os dados estão apresentados através da média  $\pm$  desvio-padrão. Após o processamento dos dados, as ADM's foram obtidas a partir do reconhecimento dos picos do sinal. Na comparação entre as medidas, enquanto os resultados para movimentos rotacionais da cervical demonstraram equivalência, os de flexão e extensão, apresentaram grandes discrepâncias. Esse fato se justifica dado o ponto de referência utilizado pelo goniômetro na vértebra C7 para estes movimentos, evidenciando sobretudo o movimento da porção inferior da cervical. O sistema desenvolvido, por sua vez, expressou a dimensão do movimento em sua totalidade.

**Palavras-chave:** Sensor inercial, Giroscópio, Goniômetro, Amplitude de Movimento, Coluna Cervical.

**Abstract:** *The mobility evaluation of the neck provides information about disorders related to joint dysfunction. Current assessment techniques present contradictory results regarding its reliability or are costly and hard to implement in small clinical centers. In this paper, we propose an inertial sensor-based system to improve the physical assessment, measuring range of motion (ROM) of the cervical spine. The proposed system consists of two inertial sensors connected to an Arduino microprocessor. The experiments comprised simultaneous measurements of the system and the manual goniometer for each movement, the data is presented by mean  $\pm$  standard deviation. After processing the data, ROM's were obtained from the recognition of signal peaks. The results for rotational movements of the neck are equivalent to the obtained by manual goniometry.*

*However, the flexion and extension movements showed large discrepancies, this fact is justified by the reference point (C7 vertebra), used in goniometry to evaluate these movements, mostly showing the movement of the lower portion of the cervical. Therefore, the developed system express the movement dimension in its totality, opening new opportunities to be explored in mobility evaluation techniques.*

**Keywords:** *Inertial sensor, Gyroscope, Goniometer, Range of Motion, Neck.*

### Introdução

A mobilidade da coluna cervical pode ser afetada por diversas doenças e condições clínicas, como Doenças Osteomioarticulares Relacionadas ao Trabalho (DORT), Síndrome do chicote, Cefaleia tensional e Cervicalgia de origem não específica, Disfunções na articulação temporomandibular (DTM) e musculatura mastigatória [1][2][3][4]. Na avaliação física, a mensuração desse parâmetro se dá pela quantificação da Amplitude de Movimento (ADM). Nesse contexto, a Radiografia é considerada o padrão ouro para estabelecer um critério de validade das medidas articulares [5], porém não é um método prático para rotina clínica e expõe os pacientes à indesejável radiação ionizante [6].

Outro método de avaliação dos movimentos, bastante utilizado no âmbito acadêmico, é representado pelos *softwares* de reconhecimento de imagens através de marcadores cutâneos. Contudo, sua aplicação é muito onerosa e de difícil implementação em consultórios de pequeno porte, devido ao grande número de câmeras e o custo do *software* necessário [7]. No que concerne à prática clínica, a goniometria manual configura como uma técnica bastante utilizada [8], entretanto, os estudos que verificam a confiabilidade do uso do goniômetro apresentam resultados contraditórios [8][9][10].

Com a facilidade de acesso às novas tecnologias, vários trabalhos têm aliado os recursos disponíveis nos sensores inerciais, como giroscópios e acelerômetros, à necessidade de instrumentação na área de saúde [11][12][13]. Isso se deve à capacidade de tais sensores captarem medidas de variação de velocidade angular e aceleração linear [14][15], normalmente associados a estudos do movimento do corpo humano. Bem como,

por serem considerados de baixo custo, elevada precisão e confiabilidade [16]. Assim, o uso destes sensores pode tornar tal tipo de análise mais prática.

Neste trabalho, o sistema proposto é baseado em um sensor inercial para suporte à avaliação física dos movimentos da cabeça. O dispositivo proporciona valores das amplitudes de movimentos da coluna cervical, tornando o exame físico mais prático, de baixo custo e alta acurácia.

## Materiais e métodos

**Sensores Inerciais** – Foram utilizados dois giroscópios e dois acelerômetros MPU 6050 [17] calibrados através da implementação do filtro de Kalman [18][19]. O sistema foi concebido pela integração dos sensores de forma que os eixos Z ficassem na mesma direção, porém em sentidos contrários, permitindo assim anular o efeito da perda linear de referência do eixo Z com a aplicação de uma média de cada amostra dos dois sinais [20]. O eixo em questão foi imprescindível para quantificar os movimentos de rotação lateral da cervical.

**Taxa de Amostragem** – O MPU 6050 utiliza a comunicação *Inter Integrated Circuit* (I<sup>2</sup>C) com o *Arduino* [21][22], que permite a conexão de vários dispositivos em série. Com o uso de endereçamento do pino *AD0* do dispositivo, pode-se conectar até duas unidades de medida inercial em série [17], permitindo uma comunicação a partir da multiplexação por divisão de tempo (TDM).

A comunicação I<sup>2</sup>C é limitada a 3.4 Mbits/s no modo *High Speed*, e 10 kbits/s no modo *Low Speed* [19][20]. O uso de dois dispositivos por TDM diminui a taxa de aquisição de dados pela metade, porém a velocidade padrão de 100 kbits/s mostrou uma taxa de amostragem média de 50 amostras por segundo para cada um dos dispositivos, sendo essa taxa suficiente para os fins do presente trabalho.

**Experimentos** – A presente pesquisa obteve aprovação do Comitê de Ética em Pesquisa da Universidade de Pernambuco (Parecer nº 019384/2014). Os voluntários, na faixa etária de 18-35 anos de ambos os gêneros, foram selecionados na Escola Politécnica da Universidade de Pernambuco (UPE) em Recife - PE. Os critérios de inclusão foram (a) a faixa etária e (b) que fossem saudáveis, isto é, não tivessem nenhuma patologia diagnosticada. Foram excluídos do estudo aqueles que apresentaram alguma disfunção que acometesse o sistema musculoesquelético e mulheres gestantes, devido às alterações biomecânicas inerentes a esse período. A assinatura do Termo de Consentimento Livre e Esclarecido (TCLE) foi feita antes da realização dos experimentos.

Para o procedimento de medição das ADM's da cervical, o voluntário permaneceu sentado em uma cadeira regulável com os pés sobre o chão, a coluna

ereta e bem apoiada no encosto. O sistema foi posicionado na parte frontal da cabeça (Figura 1), considerando que a velocidade angular independe do raio de observação.

Quanto aos movimentos, o voluntário foi orientado a realizar em velocidade moderada quarenta repetições, divididas em blocos de 4 movimentos, de cada movimento (*i.e.* Flexão, Extensão, Flexão Lateral esquerda e direita, Rotação esquerda e direita). Sendo geradas trinta medidas de ADM, das quais foram extraídos média e desvio padrão. Os valores médios do ângulo adquiridos pelo sistema aqui proposto foram obtidos e analisados de maneira instantânea e comparados a posteriori a dados de goniometria manual (tempo da análise de acordo com o processamento de imagens) [23].

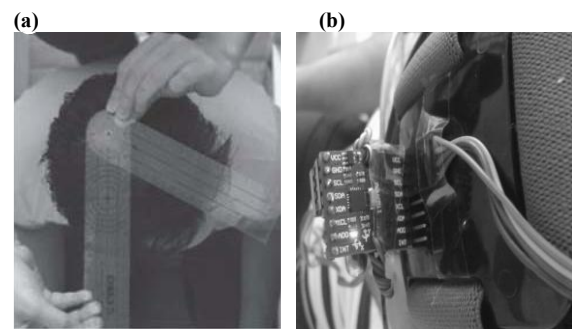


Figura 1: (a) Posicionamento do goniômetro, alinhado com a sutura sagital do crânio, e (b) do sensor inercial para avaliação dos movimentos de rotação esquerda e direita.

**Processamento do Sinal** – As informações captadas pelos sensores foram processadas pelo *MATLAB* a fim de obter os valores de amplitude de movimento da coluna cervical. Para isso, foi necessário o reconhecimento dos máximos e mínimos dos sinais obtidos pelo giroscópio. Esses dados, por sua vez, caracterizam o começo e o fim de cada movimento.

Dado a presença de um ruído de baixa intensidade e alta frequência no sinal obtido. O seguinte algoritmo foi implementado para reconhecimento independente do ruído:

1. Calcular a média do sinal;
2. Subtrair todo o sinal pela média, centralizando o sinal em zero;
3. Identificar todos os zeros;
4. Procurar o maior ou menor valor entre cada dois zeros identificados.

A partir do reconhecimento dos picos do sinal, foi realizado o cálculo da diferença entre os valores absolutos de cada máximo do sinal com o mínimo posterior a ele (Figura 2). Dessa forma, permitindo a aquisição da amplitude total de cada movimento. Os resultados foram analisados através do teste não-paramétrico de *Wilcoxon*, já que a amostra não foi considerada normalizada, segundo o teste de *Shapiro-Wilk*.

## Resultados e Discussão

Quatro voluntários, dois do gênero masculino e dois do feminino, foram avaliados de acordo com os critérios de inclusão e exclusão. Foi realizada uma explicação sobre a conduta adotada para esta pesquisa e um teste preliminar, a fim de verificar o entendimento dos participantes. A partir dos dados obtidos, gerou-se gráficos para cada tipo de movimento da coluna cervical, como representado na figura a seguir.

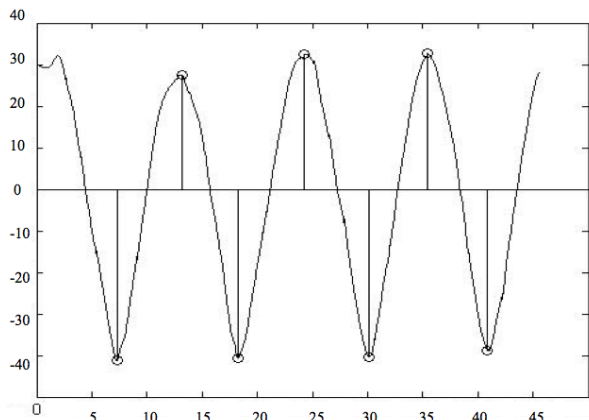


Figura 2: Sinal com os picos, em graus (eixo y), em determinado período, em segundos (eixo x), reconhecidos após a aplicação do algoritmo.

Os resultados adquiridos nas coletas estão dispostos na Tabela 1 e correspondem às medidas realizadas simultaneamente para cada movimento.

Tabela 1: Média  $\pm$  desvio-padrão das medidas das amplitudes de movimento (em graus) da coluna cervical. O asterisco representa significância estatística para o teste de Wilcoxon.

| Movimento    | Goniômetro        | Giroscópio         |
|--------------|-------------------|--------------------|
| Flexão       | 56.36 $\pm$ 7.13° | 69,6 $\pm$ 6.01°   |
| Extensão     | 53.48 $\pm$ 6.55° | 63,59 $\pm$ 9.16°  |
| Flexão Lat E | 40.26 $\pm$ 3.42° | 43.34 $\pm$ 6.04°* |
| Flexão Lat D | 43.25 $\pm$ 1.81° | 43.09 $\pm$ 5.47°  |
| Rotação E    | 66.6 $\pm$ 4.2°   | 63.88 $\pm$ 3.6°*  |
| Rotação D    | 68.96 $\pm$ 4.78° | 64.92 $\pm$ 6.26°* |

Para os movimentos de flexão e extensão, é possível perceber uma diferença considerável entre os valores obtidos pelos dispositivos de avaliação. Atribui-se a isso, o fato de que a referência utilizada para o goniômetro manual ser a vértebra C7, a qual compõe a coluna cervical baixa [24]. Como verificado na Figura 3(a), para o caso da flexão, a goniometria manual mensura unicamente o ângulo ( $\theta$ ) compreendido entre a coluna cervical baixa e média, tendo como eixo a vértebra C7.

Por sua vez, o sistema com sensor inercial, Figura 3(c), encontra-se localizado na cabeça, proporcionando uma magnitude de movimento mais expressiva, haja vista a participação das porções média e alta da cervical

[25]. Sendo assim, o sistema é capaz de perceber a resultante do movimento da coluna cervical como um todo (i.e.  $\theta+\alpha$ ). Inclusive o movimento angular que ocorre entre a vértebra C1 e a parte occipital do crânio ( $\alpha$ ), diferentemente das informações fornecidas pelo goniômetro manual.

Ao considerar os movimentos rotacionais, os quais ocorrem em torno do eixo longitudinal e no plano transversal, não seria esperada diferença entre as medidas realizadas, Figura 3(b) e 3(d). Isso é corroborado pelos resultados dessa pesquisa, os quais são similares para ambos os lados (nível de significância  $p < 0,05$ ).

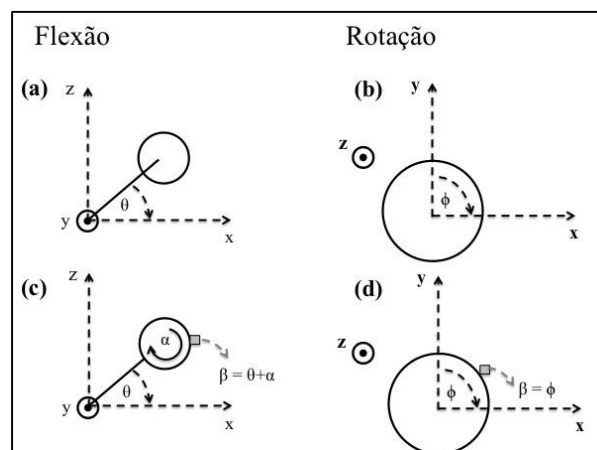


Figura 3: Representação esquemática da análise da goniometria manual para os movimentos de flexão (a) e de rotação lateral (b); e da análise da goniometria baseada em sensores inerciais para os movimentos de flexão (c) e rotação lateral (d).

## Conclusão

O sistema baseado em sensores inerciais permite adquirir as amplitudes angulares dos movimentos da coluna cervical. Entretanto, os valores obtidos diferem dos dados da goniometria manual, em consequência de a referência da avaliação convencional ser diferente para os movimentos no plano frontal e no mediano.

Diante desses encorajadores resultados preliminares, se faz necessária a realização de exaustivas pesquisas com tais dispositivos, a fim de elucidar todas as possibilidades de informações que podem ser adquiridas pelos sensores em questão. Isso além de avaliar eventuais variações individuais que possam interferir nas medições.

Devido à capacidade dos sensores inerciais de medir tanto ângulo, como aceleração angular, é possível adicionalmente explorar essa ferramenta para inferir sobre a qualidade com que os deslocamentos são executados. Essa informação promoveria um avanço para a prática da avaliação, já que é uma informação relevante e, hoje, pouco observada pelos profissionais, talvez pela falta de ferramentas apropriadas. Porém difícil de se mensurar de forma quantitativa, graças a sua subjetividade, o que dificulta a comparação após o tratamento.

## Agradecimentos

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES, ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Sistemas e à Universidade de Pernambuco.

## Referências

- [1] Strimpakos N. The assessment of cervical spine. Part 1: Range of motion and proprioception. *Journal of Bodywork & Movement Therapies*. 2011; 15(1):114-124.
- [2] Gross A, Miller J, D'Sylva J, Burnie SJ, Goldsmith CH, Graham N, Haines T, Brønfort G, Hoving JL. Manipulation or mobilisation for neck pain: Systematic review. *Cochrane Database of Systematic Reviews*. 2010; (1):315-33.
- [3] Biondi DM. Physical treatments for headache: A structured review. *Headache*; 2005; 45(6):738-46.
- [4] Olivo AS, Magee DJ, Parfitt M, Major P, Tie NM. The association between the cervical spine, the stomatognathic system, and craniofacial pain: a critical review. *Journal of Orofacial Pain*. 2006; 20(4):271-87.
- [5] Lavernia C, D'Apuzzo M, Ross MD, Lee D. Accuracy of knee range of motion assessment after total knee arthroplasty. *The Journal of Arthroplasty*. 2008; 23(6):85-91.
- [6] Florencio LL, Pereira A, Silva ERT, Pegoretti KAS, Gonçalves MAC, Bevilacqua-Grosse D. Concordância e confiabilidade de dois métodos não-invasivos para a avaliação da amplitude de movimento cervical em adultos jovens. *Brazilian Journal of Physical Therapy*. 2010; 14(2):175-81.
- [7] Pohl MB, Patel C, Wiley JP, Ferber R. Gait biomechanics and hip muscular strength in patients with patellofemoral osteoarthritis. *Gait & Posture*. 2013; 37(3):440-4.
- [8] Cleffken B, Breukelen GV, Mameren HV, Brink P, Damink SO. Test-retest reproducibility of elbow goniometric measurements in a rigid double-blinded protocol: Intervals for distinguishing between measurement error and clinical change. *Journal of Shoulder and Elbow Surgery*. 2007; 16(6):788-94.
- [9] Wibault J, Vaillant J, Vuillerme N, Dederling A, Peolsson A. Using the cervical range of motion (CROM) device to assess head repositioning accuracy in individuals with cervical radiculopathy in comparison to neck- healthy individuals. *Manual Therapy*. 2013; 18(5): 403-9.
- [10] Austin MS, Ghanem S, Joshi A, Trappler R, Parvisi J, Hozack WJ. The assessment of intraoperative prosthetic knee range of motion using two methods. *The Journal of Arthroplasty*. 2008; 23(4):515-21.
- [11] Duc C, Salvia P, Lubansu A, Feipel V, Aminian K. A wearable inertial system to assess the cervical spine mobility: Comparison with an optoelectronic-based motion capture evaluation. *Medical Engineering & Physics*. 2014; 36(1):49-56.
- [12] Howcroft J, Kofman J, Lemaire ED. Review of fall risk assessment in geriatric populations using inertial sensors. *Journal of Neuroengineering and Rehabilitation*. 2013; 91(10):1-21.
- [13] Chung PYM, Ng GYF. Comparison between an accelerometer and a three-dimensional motion analysis system for the detection of movement. *Physiotherapy*. 2012; 98(3):256-9
- [14] Bonnet V, Mazzà C, McCamley J, Cappozzo A. Use of weighted Fourier linear combiner filters to estimate lower trunk 3D orientation from gyroscope sensors data. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*. 2013; 10(29):1-7.
- [15] Ueno DT, Sebastião E, Corrazza DI, Gobbi S. Methods for assessing physical activity: a systematic review focused on older adults. *Brazilian Journal of Kinesiology and Human Performance*. 2013; 15(2):256-65.
- [16] Mohd-Yasin F, Zaiyadi N, Nagel DJ, Ong DS, Korman CE, Faidz AR. Noise and reliability measurement of a three-axis micro-accelerometer. *Microelectronic Engineering*. 2009; 86(4):991-5.
- [17] InvenSense inc. MPU-6000 and MPU-6050 Product Specification Revision 3.2, 2011.
- [18] Djurić-Jovičić MD, Jovicic NS, Popović DB, Djordjević AR. Nonlinear optimization for drift removal in estimation of gait kinematics based on accelerometers. *Journal of Biomechanics*. 2012; 45(16):2849-54.
- [19] Jurman D, Jankovec M, Kamnik R, Topič M. Calibration and data fusion solution for the miniature attitude and heading reference system. *Sensors and Actuators A: Physical*. 2007; 138 (2): 411-20.
- [20] Roeteberg D, Luinge HJ, Baten CTM, Veltink PH. Compensation of magnetic disturbances improves inertial and magnetic sensing of human body segment orientation. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*. 2005; 13 (3): 395-405.

- [21] UM10204 - I<sup>2</sup>C-bus specification and user manual  
NXP Semiconductors. 2014; Revision 6:1-64.
- [22] Eisenreich D, DeMuth B. Designing Embedded  
Internet Devices, A volume in Embedded  
Technology. 2002.
- [23] Norkin CC, White DJ. Measurement of joint  
motion: a guide to goniometry. 4<sup>a</sup> ed. Philadelphia:  
F. A. Davis; 2009.
- [24] Chaves TC, Nagamine HM, Belli JFC, de Hannai  
MCT, Bevilaqua-Grossi D, de Oliveira AS.  
Reliability of fleximetry and goniometry for  
assessing neck range of motion among children.  
Brazilian Journal of Physical Therapy. 2008;  
12(4):283-9.
- [25] Swartz EE, Floyd RT, Cendoma M. Cervical spine  
functional anatomy and the biomechanics of injury  
due to compressive loading. Journal of Athletic  
Training. 2005; 40(3):155-61.