



MEDIDA DE DISTÂNCIA COM ACELERÔMETROS (MEMS) EM DESLOCAMENTO MANUAL UNIDIMENSIONAL.

John Kennedy Schettino de Souza¹, Carlos Julio Tierra Criollo²

¹ NEPEB - UFMG, Belo Horizonte, Brasil, jkssbh@deii.cefetmg.br

² NEPEB - UFMG, Belo Horizonte, Brasil, carjulio@cpdee.ufmg.br

Resumo: Este trabalho apresenta um estudo com acelerômetros que utilizam tecnologia MEMS. Destina-se a medição de distância em deslocamento unidimensional de baixa aceleração ($\approx 1\text{ms}^{-2}$), realizado através de movimentos manuais. Para esta faixa de aceleração o sistema é mais susceptível a erros, uma vez que as variações de offset e ruídos inseridos no sinal apresentam em alguns instantes a mesma ordem de grandeza do sinal oriundo dos movimentos manuais aplicados ao acelerômetro. Para realização dos ensaios foi utilizado um deslocamento característico que é constituído de três estágios: repouso-deslocamento-repouso. O processamento do sinal apresenta duas etapas distintas: sendo a primeira responsável pela detecção do movimento (Energia do sinal) e a segunda pelo cálculo da distância (Wavelet). Nos ensaios realizados foi obtido um desvio padrão de 0,693 levando a um erro de 2,83%.

Palavras chave: acelerômetro, MEMS, Wavelet.

1. INTRODUÇÃO

Diversos trabalhos já foram realizados neste sentido, uma vez que este tema é de grande interesse para comunidade científica, pois vários problemas poderão ser resolvidos [1] agregando-se a solução o baixo custo dos acelerômetros (MEMS).

Dentre as áreas de aplicação dos acelerômetros destacam-se o setor Automobilístico [2][3][4] principal responsável pela crescente demanda destes dispositivos. Nos Sistemas de Navegação Inercial onde é utilizado para obtenção da aceleração linear [5] ou para obtenção das projeções do vetor de gravidade [6]. Na área biomédica inúmeras são as aplicações envolvendo acelerômetros de 1 a 3 eixos [7][8][9] inclusive como alternativa de baixo custo aos sistemas ópticos [10].

Diversos são os estudos realizados para obtenção de deslocamento tendo como dispositivo sensório o acelerômetro [11][12][13].

O princípio básico para o cálculo de posição com acelerômetro é a integração dupla do sinal de aceleração obtido ao longo do deslocamento. Entretanto, alguns elementos comprometem a

realização correta de tal medida. O primeiro problema tem origem nos ruídos inseridos no sinal durante a captura. O segundo envolve a variação da polarização existente no sinal gerado pelo acelerômetro. Os acelerômetros avaliados nos experimentos (ADXL330 e MMA7260QT [13][14]) apresentaram variação do nível DC (*Bias*), quando colocado em movimento. Um outro fator que altera o offset é a variação da temperatura. As variações do offset comprometem a medida de distância, uma vez que o sinal é integrado ao longo do tempo o que torna o erro acumulativo e a medida divergente da real [12].

A minimização destes problemas pode ser realizada utilizando uma recalibração periódica através de informações oriundas de dispositivos externos. Através da diferença entre o sinal informado pelo acelerômetro e os sinais externos é possível realizar a estimação da distância percorrida utilizando o filtro de Kalman [12]. Entretanto, algoritmos baseados em filtro de Kalman demandam um processamento matemático que não são suportados por algumas categorias de processadores presentes em sistemas embarcados.

Existe também uma preocupação com relação aos algoritmos aplicados na integração numérica. Estudo realizado mostra que o erro associado às medidas obtidas depende muito mais das variações da polarização e da temperatura do que do algoritmo de integração [13].

Além destes trabalhos diversos são artigos publicados pelos próprios fabricantes de acelerômetro com o objetivo de difundir a sua utilização [16][17][18].

A solução proposta neste estudo busca atender aplicações que envolvam movimentos manuais, de baixa aceleração, cujo movimento realizado é precedido e finalizado por um período tempo sem movimento. Através deste movimento característico é possível obter o deslocamento realizado em um eixo utilizando a técnica detecção de movimento seguido da aplicação de Wavelet para calcular a distância percorrida.

2. OBJETIVO

O objetivo deste trabalho é analisar a viabilidade da utilização de acelerômetro (Tecnologia MEMS) para medição de distância em um único eixo em movimento manual de baixa aceleração ($\approx 1\text{ms}^{-2}$).

3. MÉTODOS

O estudo foi realizado em duas etapas distintas: identificação do sinal gerado pelo acelerômetro em função do movimento manual e realização de ensaios em ambiente controlado.

Foi utilizado o acelerômetro da FreeScale MMA7260 configurado para a faixa de trabalho de $\pm 1,5\text{G}$ que possibilita medidas de aceleração de até $\pm 14,7\text{ms}^{-2}$. Sua resolução é de 800mV/G para 3V de alimentação sendo que sua resolução varia linearmente com a alimentação. O acelerômetro foi montado em uma placa de circuito impresso que possui um filtro de limitando a banda em 2KHz , entretanto um segundo filtro foi colocado na entrada do conversor AD limitando a banda para 50Hz , uma vez que a banda de interesse para este estudo é inferior a 10Hz . A taxa de amostragem de 1KHz sendo realizando uma reamostragem por software próxima de 100Hz .

Para coleta dos dados foi utilizada a placa de aquisição USB 6009 da National Instruments configurada em modo "single end", ou seja, referenciada ao terra com faixa de entrada de $\pm 4,5\text{V}$ e com 13 bits gerando uma resolução $1,1\text{mV/bit}$.

Foram coletadas amostras de movimentos manuais para a detecção da banda de interesse e com base no espectro de frequência obtido foi definida a frequência de corte do filtro PB.

Os ensaios foram divididos em duas faixas: lenta (Figura 1) que traduz o movimento de um mouse e rápida (Figura 2) que são intratáveis para uma aplicação com um mouse, pois o usuário não tem como acompanhar o deslocamento do cursor na tela. Os sinais obtidos para os ensaios rápido e lento apresentaram uma banda de passagem abaixo de 10Hz .

Com base nestes ensaios foi estabelecido um filtro PB com $F_c=10\text{Hz}$, pois as frequências de interesse estão abaixo deste limite.

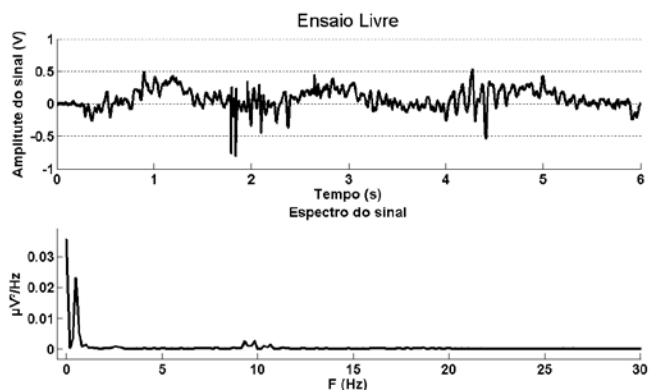


Figura 1 - Movimento Lento

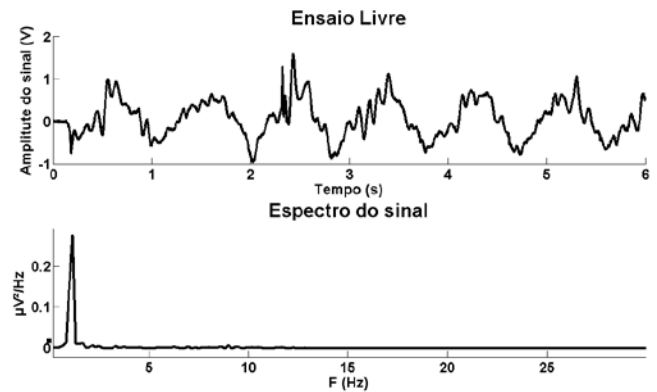


Figura 2 – Movimento Rápido

Para a segunda etapa dos estudos foi utilizada uma plataforma (Figura 3) para fixação do acelerômetro garantido que o seu deslocamento ocorra em um único eixo.

Esta plataforma é constituída de uma impressora jato de tinta, sendo os acelerômetros fixados com defasagem de 180° no porta cartucho. Para os ensaios foram realizados deslocamentos no porta cartucho em um único eixo, uma vez que o porta cartucho está apoiado em uma barra de fixação que garante apenas movimentos laterais, típicos de uma impressora.

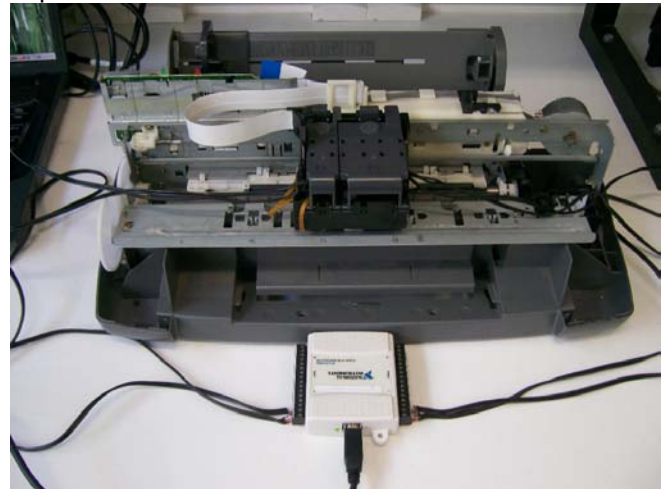


Figura 3 - Plataforma de ensaio

A utilização de dois acelerômetros possibilitou o cálculo com redundância onde foram obtidos valores mais próximos do desejado.

A Figura 4 apresenta as curvas de aceleração, velocidade e posição. O movimento associado a estas curvas é um deslocamento 13cm em um único eixo tendo todo ensaio a duração de 6s . Para melhor visualização do sinal foram apresentados apenas os 3 primeiros segundos onde de fato ocorreu o movimento.

Na curva de aceleração é possível observar que o início do movimento ocorre próximo a $t=0,9\text{s}$. Após a parada do acelerômetro a aceleração não retorna a origem do eixo do gráfico de aceleração permanecendo um valor residual negativo que refletirá

num deslocamento contrário ao deslocamento real. Isto ocorreu devido à variação do offset após a movimentação do acelerômetro.

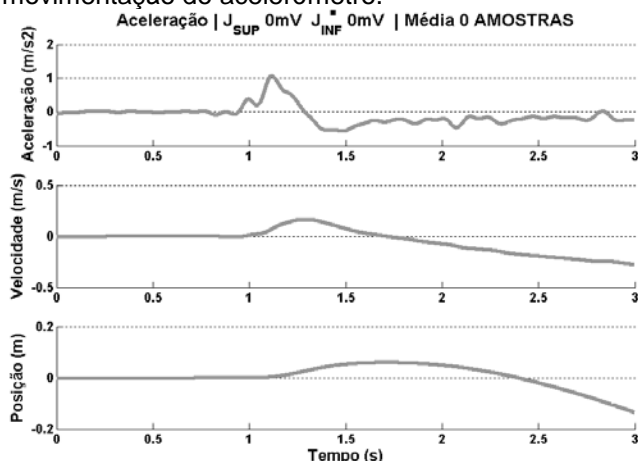


Figura 4 - Curva Aceleração - Velocidade – Posição

A Figura 5 apresenta um novo ensaio cuja duração da coleta foi de 10s..

Ao sinal de aceleração foi aplicada um filtro PB Butterworth com $F_C=10\text{Hz}$ selecionando a faixa de interesse. Neste novo ensaio é possível observar a diferença do offset do sinal de aceleração antes e depois do movimento.

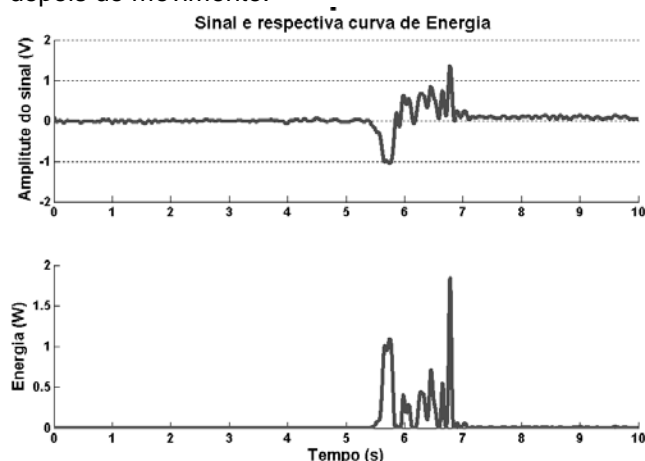


Figura 5 - Energia do sinal

Para retirar a componente DC relativa ao offset o sinal de aceleração foi submetido a um filtro PA Butterworth. Para definir a frequência de corte desde filtro foi considerado o comportamento característico do ensaio que garante o acelerômetro parado ao término do ensaio o que reduz a uma velocidade igual zero. Baseado nesta premissa arbitra-se uma frequência de corte próxima de 0Hz, filtra o sinal de aceleração e em seguida realiza sua integração. Sendo o resultado da integração a curva de velocidade, busca-se então na curva de velocidade o valor zero, ou seja, a identificação do acelerômetro parado. Caso não seja obtido valor de velocidade zero desloca-se a frequência de corte e aplica-se novamente o processo para obtenção de velocidade zero. Este processo é repetido de forma automática até obter o valor zero ou caso haja um divergência do

valor zero. Obtido o zero na curva de velocidade o sinal será integrado mais vez para que seja obtido o deslocamento final.

Ao aplicar este método não foi obtida uma FC que levasse a velocidade a zero.

Novamente a informação do movimento característico repouso-deslocamento-repouso, foi aplicada sendo que desta vez com objetivo de identificar as regiões de movimento e repouso. Nesta nova abordagem as regiões de repouso foram desconsideradas, pois embora não contribuam com o deslocamento efetivo apresentam aceleração relativa a ruídos e offset. Para detecção da região de movimento, foi utilizada a informação de energia do sinal conforme Figura 5.

Considerando agora apenas o trecho relativo ao movimento e aplicando-se o mesmo algoritmo de busca novamente não foi obtida a velocidade zero.

Uma nova abordagem para tratamento do problema foi à utilização de Wavelet com objetivo de separar a componente DC responsável pela aceleração estática da componente AC responsável pela aceleração dinâmica. Novamente o mesmo algoritmo de busca do valor zero na curva de velocidade foi aplicado com Wavelet.

Na Wavelet a busca automática a busca da frequência de corte é realizada através da identificação de quais os coeficientes que irão compor a curva de detalhes e a de aproximação.

A curva de detalhes irá informar a aceleração relativa ao movimento enquanto já a curva de aproximação será responsável pela retirada da componente DC do sinal relativa ao offset ao longo do movimento.

Na Figura 6 no gráfico de velocidade (curva de detalhes) é possível identificar a convergência da velocidade para zero ao término do movimento.

A curva de aproximação apresenta um coeficiente angular que cresce linearmente e que é responsável pela divergência da curva de velocidade do valor zero no eixo Y.

O gráfico de posição apresenta a integração do sinal de velocidade e através da curva de detalhes é possível obter a distância percorrida pelo acelerômetro. É possível observar nesta mesma curva que o acelerômetro encontra-se em repouso, ou seja, posição constante.

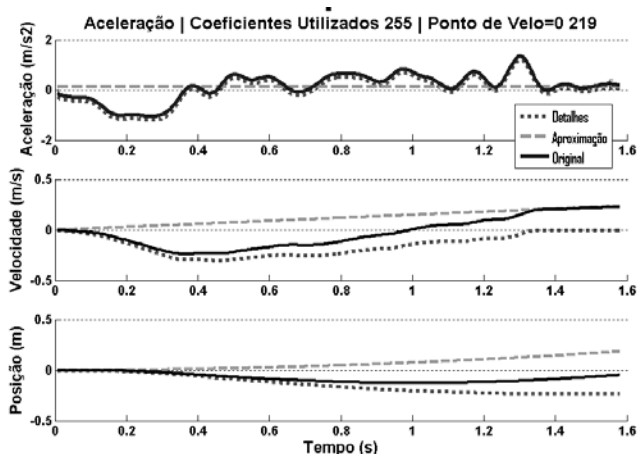


Figura 6 – Wavelet

4. RESULTADOS

Foram realizados 10 ensaios sendo que na Tabela 1 são apresentadas duas colunas onde em S/R (sem redundância) foi considerada a informação de apenas um único acelerômetro já na coluna C/R (com redundância) os valores correspondem a média dos dois acelerômetros.

Tabela 1 – Deslocamento em cm

Ensaio	S/ R	C/ R
A	26,08	25,98
B	24,49	24,32
C	25,26	24,69
D	26,00	25,39
E	25,10	24,92
F	23,54	23,71
G	24,48	24,14
H	23,72	23,89
I	24,03	23,82
J	24,77	24,47
Média	24,75	24,53
DP	0,831	0,693

Aplicando-se a redundância (C/R) obteve-se o um desvio padrão de 0,693 o que leva a um erro de 2,83%.

5. DISCUSSÃO

Após a obtenção dos resultados aplicando-se Wavelet foi possível observar que a curva de Aproximação obtida assemelhava-se ao valor médio do sinal na região do movimento. Retirando o valor médio do sinal original foi obtida a curva de detalhes.

Em [12] são apresentados resultados obtidos através de movimentos em um manipulador em três situações distintas de aceleração: alta= 10ms^{-2} , média= 8ms^{-2} e baixa= 3ms^{-2} . Para os dois casos iniciais, utilizando Kalman, foram obtidos um desvios de 1,55cm e -1,08cm da distância real, para alta e média aceleração, entretanto não foi apresentado o resultado para baixa aceleração. Inclusive foi necessário um ajuste manual da polarização sinal para aplicação do filtro de Kalman.

Os resultados obtidos nestes ensaios tratam acelerações próximas de 1ms^{-2} .

Em [19] é apresentado a dependência entre erro e tempo de integração o que neste caso é minimizado devido a natureza dos ensaios que é caracterizado pelo comportamento repouso-deslocamento-repouso.

6. CONCLUSÃO

Embora os resultados tenham sido obtidos via Wavelet eles também poderão ser alcançados através do valor médio, o que reduz o tempo de processamento.

Nos ensaios realizados o deslocamento aplicado no acelerômetro caracterizou-se pelo comportamento repouso-deslocamento-repouso. Novos ensaios serão realizados aplicando ao acelerômetro vários deslocamentos consecutivos com o mesmo comportamento para medidas de distâncias maiores que 20 cm, pois a obtenção de resultados positivos poderá viabilizar a eliminação de dispositivos externos utilizados na recalibração periódica do sistema.

REFERÊNCIAS

- [1]. C. Verplaetse, "Inertial proprioceptive devices: Self-motion-sensing toys and tools," IBM Systems Journal, vol. 35, numbers 3&4, 1996.
- [2]. K. S. Mostov, A. A. Soloviev, T. K. J. Koo, "Accelerometer Based Gyro-Free Multi-Sensor Generic Inertial Device for Automotive Applications," IEEE, 1998.
- [3]. J.H. Chen, S.C. Lee, D.B. DeBra "Gyroscope Free Strapdown Inertial Measurement Unit by Six Linear Accelerometers", Journal of Guidance, Control, and Dynamics, Vo1.17, No. 2. March-April 1994, p. 286-290.
- [4]. Cheung, J.Y.M. "Model Reference Adaptive Control of Vehicle Active Suspension", Road Vehicle Automation I1 Towards Systems Integration. Proceedings of the 2nd International Conference on Road Vehicle Automation, Bolton, UK, 11-13 Sept. 1995).
- [5]. S. C. Lee, Y. C. Huang, "Innovative Estimation Method with Measurement Likelihood for all-accelerometer type Inertial Navigation System," IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, vol. 38, number 1, 2002.
- [6]. P. Iscold, G. R. C. Oliveira, A. A. Neto, G. A. S. Pereira, L. A. B. Tôrres, "Desenvolvimento de Horizonte Artificial para Aviação Geral baseado em Sensores MEMS," V Simpósio Brasileiro de Engenharia Inercial, 2007.
- [7]. A. K. Smith, S. G. P. Togeiro, "Diagnostics methods for sleep disorders," Rev. Bras. Psiquiatr. Vol. 27 (Supl I), pp. 8-15. 2005.
- [8]. N. Mamizuka, M. Sakane, K. Kaneoka, N. Hori e N. Ochiai, "Kinematic Quantitation of the Patellar Tendon Reflex Using a Tri-Axial Accelerometer." J. of Biomechanics, Vol. 40, Issue 9, pp 2107-2111. 2007

- [9]. D. M. Karantonis, M. R. Narayanan, M. Mathie, N. H. Lovell, e B. G. Celler, "Implementation of a Real-Time Human Movement Classifier Using a Triaxial Accelerometer for Ambulatory Monitoring," *IEEE Trans. Inform. Tech. Biomed.*, Vol.10, No 1, January 2006.
- [10]. R. E. Mayagoitia, A. V. Neneb, P. H. Veltink, "Accelerometer and rate gyroscope measurement of kinematics: an inexpensive alternative to optical motion analysis systems," *Journal of Biomechanics* 35, pp 537–542, 2002.
- [11]. L. J. Figueiredo, Ana R. Gafaniz, G. S. Lopes e R. Pereira, "Aplicações de Acelerômetros," *Instrumentação e Aquisição de Sinais - Monografia Lisboa, Portugal*, 19 Dezembro 2007.
- [12]. G. PANG and H. LIU, "Evaluation of a Low-cost MEMS Accelerometer for Distance Measurement," *Journal of Intelligent and Robotic Systems* 30: 249–265, 2001.
- [13]. Analog Devices, "Small, Low Power, 3-Axis±3g iMEMS Accelerometer – ADXL330," 2007.
- [14]. Freescale Semiconductor, "Technical Data ±1.5g – 6g Three Axis Low-g Micromachined Accelerometer," Rev.5 03/2008.
- [15]. Y.K. Thong, M.S. Woolfson, J.A. Crowe, B.R. Hayes-Gill, D.A. Jones, "Numerical double integration of acceleration measurements in noise," *Measurement* 36, pp73–92, 2004.
- [16]. K. Tuck, "Measuring Freefall using Freescale's MMA7360L 3-Axis Accelerometer," *Application Note*, Freescale Semiconductor, AN3459 Rev 1, 06/2007.
- [17]. K. Seifert, O. Camacho, "Implementing Positioning Algorithms Using Accelerometers," *Application Note*, Freescale Semiconductor, AN3397 Rev 0, 02/2007.
- [18]. C. Kitchin, "Using Accelerometers in Low g Applications," *Application Note*, Analog Devices, AN-374.
- [19]. Y.K. Thong, M.S. Woolfson, J.A. Crowe, B.R. Hayes-Gill, R.E. Challis, "Dependence of inertial measurements of distance on accelerometer noise," *Measurement Science and Technology* 13, pp1163–1172, 2002.