



SISTEMA DE CAPTURA DE MOVIMENTOS BASEADO EM UNIDADE DE MEDIDA INERCIAL

FARIA, Alexandre Pereira de

Resumo

Sistemas de captura de movimentos têm encontrado aplicações em áreas como automação, bioengenharia e entretenimento. Na biomecânica a captura de movimentos é uma ferramenta fundamental para a caracterização e análise dos membros e articulações envolvidos na marcha humana. Dentre as diversas técnicas desenvolvidas, o rastreamento de movimentos por meio de sensores baseados em unidade de medida inercial possibilita a construção de sistemas de baixo custo e de grande acurácia. Este trabalho apresenta um levantamento bibliográfico acerca da construção de tais sistemas aplicados a captura da marcha humana. Procurou-se identificar os recursos tecnológicos utilizados e destacar os principais resultados associados à sua adoção na análise da marcha.

Palavras-chave: Biomecânica; Captura de Movimentos; Unidade de Medida Inercial

Abstract

Motion capture systems have been applied in areas such as automation, entertainment and bioengineering. In the biomechanics studies of human gait, motion capture is an important tool to characterize and analysis limbs and joints during this action. Among the several techniques developed, tracking movements by inertial measurement unit devices allows to design low cost and great accuracy systems. This work presents a bibliographical survey about such systems applied to the capture of human gait. The main aim was to identify the technological resources and to highlight the results associated to their adoption in gait analysis.

Keywords: Biomechanics; Motion Capture; Inertial Measurement Unit

INTRODUÇÃO

Sistemas de captura de movimentos encontram aplicação em áreas diversas como a automação no desenvolvimento de robôs inteligentes, na indústria do entretenimento por meio de implementações que aumentem o nível de interação do usuário em sistemas de realidade virtual ou ainda na bioengenharia como ferramenta auxiliar no diagnóstico de patologias associadas aos movimentos humanos [1]–[3]. Ao longo dos séculos, o movimento humano têm sido objeto de estudo e diferentes técnicas de registros foram e estão sendo desenvolvidas para caracterizar e analisar as estruturas e ações complexas do aparelho locomotor durante a realização de tarefas, como por exemplo, andar, correr, pular, nadar [4]. Durante o século XVII, a visão mecanicista do movimento humano floresceu com a metafísica de Descartes e a mecânica de Galileu. Neste contexto ocorreu a publicação da obra póstuma daquele que é considerado o pai da biomecânica moderna Giovanni Borrelli. *De Motu Animalium*, título retirado do tratado homônimo de Aristóteles, consolida a analogia do sistema locomotor dos animais como uma máquina e, portanto, passível de ser descrito por meio da geometria e da matemática (Figura 1). Borelli escreveu uma obra onde não apenas ilustra esta analogia por meio desenhos e diagramas, mas também prova matematicamente sua teoria [5].

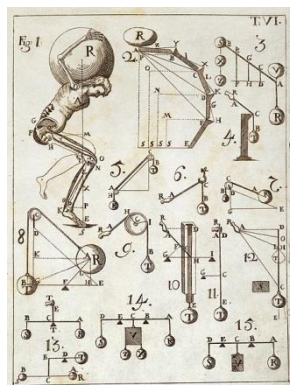


Figura 1

Fonte: commons.wikimedia.org/wiki/File:Houghton_IC6_B6447_680db_De_motu_animalium,_TAB_IV.jpg

Dada as inerentes limitações dos sentidos para observar e interpretar os movimentos humanos, novas técnicas de registro, como a fotografia e o cinema no Século XIX, o vídeo e as tecnologias digitais no Século XX, desempenharam um papel fundamental para a obtenção de informações que permitiram o avanço do conhecimento biomecânico dos membros e juntas que participam dos processos de locomoção e, em especial, a marcha humana[6].

A marcha humana (ou o caminhar) é um processo complexo que envolve a coordenação dos sentidos, dos pensamentos e de várias partes do sistema locomotor humano com a tarefa de permitir a locomoção do indivíduo, autônoma e adiante, de um lugar para outro [6]. O objetivo da análise da marcha pode ser dividida em duas partes: a cinemática, que leva em consideração a geometria do movimento, e a cinética, que leva em consideração as causas do movimento. A análise da marcha divide a marcha em duas grandes fases que englobam o chamado ciclo da marcha: a fase apoio e a fase balanço. Além disso, essas fases são divididas em etapas como ilustrado a seguir (Figura 2)

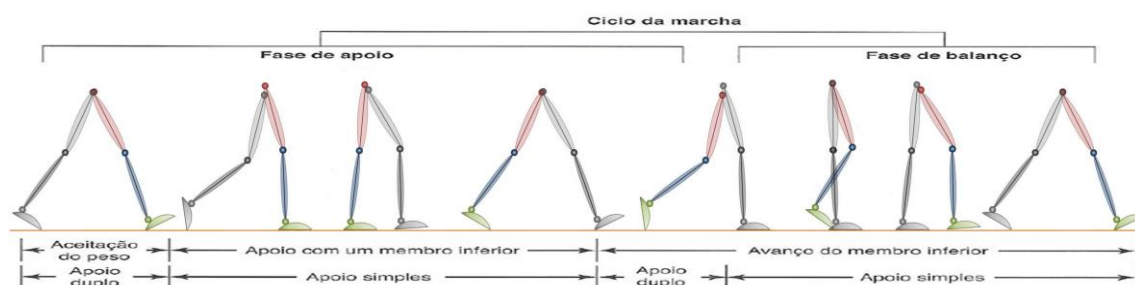


Figura 2

Fonte: adaptado de https://commons.wikimedia.org/wiki/File:GaitCycle_by_JaquelinPerry.jpg

Conforme Barbosa (2011), todos os seres humanos exibem um mesmo padrão de marcha, chamada de marcha normal, a qual pode variar conforme características individuais. Isto permite que a análise da marcha consiga identificar parâmetros fora deste padrão e caracterizar o que é conhecido como marcha patológica. A marcha patológica pode estar associada a enfermidades diversas, como aquelas de natureza genética, neurológica ou traumática. Em relação a estas enfermidades, de acordo com [2] a análise da marcha tem

importância fundamental no direcionamento do tratamento, no planejamento cirúrgico, na prescrição e adequação de órteses, próteses, na comparação pré e pós-tratamento. Sendo assim, ainda segundo (Saad, 1996) a análise da marcha tem grande espectro de aplicações em área como a pesquisa clínica, a medicina física e de reabilitação, a cirurgia ortopédica, a clínica médica, a medicina esportiva e a fisioterapia.

Do que foi posto fica evidente a necessidade do desenvolvimento de ferramentas cada vez mais precisas e de baixo custo para a realização de experimentos que possibilitem a obtenção de dados cinemáticos e cinéticos da marcha. Atualmente existe uma grande quantidade de ferramentas e técnicas que permitem a obtenção, processamento e análise destes dados. Estes sistemas podem ser classificados segundo a forma com a qual os movimentos são rastreados e os tipos de dados capturados [7] [8] :

- Sistemas acústicos: baseado na transmissão-recepção de ondas sonoras. Tipo de dados: posição e orientação no espaço;
- Sistemas magnéticos: similar ao anterior, mas baseados em marcadores magnéticos imersos num campo eletromagnético de baixa frequência. Tipo de dados: posição e orientação no espaço;
- Sistemas mecânicos: baseados em sensores flexíveis como, extensômetros e eletrogoniômetros. Tipo de dados: distância, ângulos, força;
- Sistemas óticos: baseados no rastreamento de marcadores reflexivos ou no processamento de imagens. Tipo de dados: posição e orientação no espaço.
- Sistemas inerciais: baseados em dispositivos com Unidades de Medida Inercial (IMU, *Inertial Measurement Unit*) como giroscópios, acelerômetros e magnetômetros. Tipos de dados: ângulos, velocidade, aceleração e posição no espaço.

Conforme [8], qualquer destes sistemas apresentam algum tipo de desvantagem seja em relação ao custo, a precisão, a latência entre a captura e a análise dos dados, a limitação de movimentos, oclusão dos sensores durante a captura ou o estágio de desenvolvimento tecnológico. Os sistemas inerciais

merecem destaque em relação aos outros por conta do baixo custo dos dispositivos e da plataforma de captura e processamento dos dados, velocidade de transmissão e acurácia dos dados, os quais podem ser processados e visualizados em tempo real. Contudo, uma série de problemas associado ao desenvolvimento destes sistemas devem ser enfrentados como, por exemplo, o conhecimento da tecnologia, a interferência eletromagnética e o acoplamento de vários sensores.

Neste trabalhos procura-se identificar os subsídios para a implementação de um sistema de captura de movimentos baseados em sensores inerciais. Em particular, investiga-se a utilização de dispositivos IMU como o MPU (*Motion Processing Unit*) da Invensense®, um sensor triaxial com 6 graus de liberdade que contém um giroscópio e um acelerômetro. Para tanto, foi realizado um levantamento bibliográfico acerca da descrição e utilização deste tipo de sensor e periféricos em sistemas de captura de movimentos humano. Adicionalmente, conforme tutoriais disponíveis na WEB [9] foi efetivada a montagem de um sistema embarcado simples utilizando o MPU 6050 associado ao micro controlador Arduino para a captura e processamento dos dados, os quais puderam ser visualizados em tempo real por meio de interfaces gráficas desenvolvidas em linguagem Python e Processing.

METODOLOGIA

Com o objetivo de tomar conhecimentos acerca dos dispositivos IMU e sua utilização em sistemas de captura de movimentos humano as seguintes questões foram elaboradas:

1. O que são e como funcionam os dispositivos IMU, e em particular, o MPU 6050?
2. Como é realizada a integração de dispositivos IMU e a plataforma Arduino em sistemas de captura de movimentos?
3. Como foi realizada a visualização dos dados capturados?
4. Quais as vantagens e desvantagens encontradas em relação a utilização destes dispositivos?

Com base nestas questões um levantamento bibliográfico foi realizado por meio de uma pesquisa no site de busca Google utilizando descritores em português – captura de movimento, marcha humana, Unidade de Medida Inercial, IMU, MPU 6050, Arduino – e suas respectivas traduções para o inglês e espanhol. Por meio desta pesquisa foi levantar 120 trabalhos acadêmicos, dentre os quais foram selecionados 22 que apresentavam uma discussão acerca da implementação do sistema utilizando o MPU 6050.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Por meio dos documentos levantados respondemos a seguir as questões propostas.

1. O que são e como funcionam os dispositivos IMU, e em particular, o MPU 6050?

Conforme [10], IMU são dispositivos baseados na tecnologia MEMS – *Micro Electro-Mechanics System* (Sistemas Micro Eletromecânicos) que são circuitos integrados que exploram as propriedades mecânicas e elétricas do silício. Dessa forma um IMU pode responder a variações físicas como mecânicas, térmicas, químicas ou eletromagnéticas do meio, e transformar essas variações em sinais elétricos (Figura 3). São exemplos desses sensores os acelerômetros (variação na aceleração), os giroscópios (variação na velocidade de rotação e variações angulares).

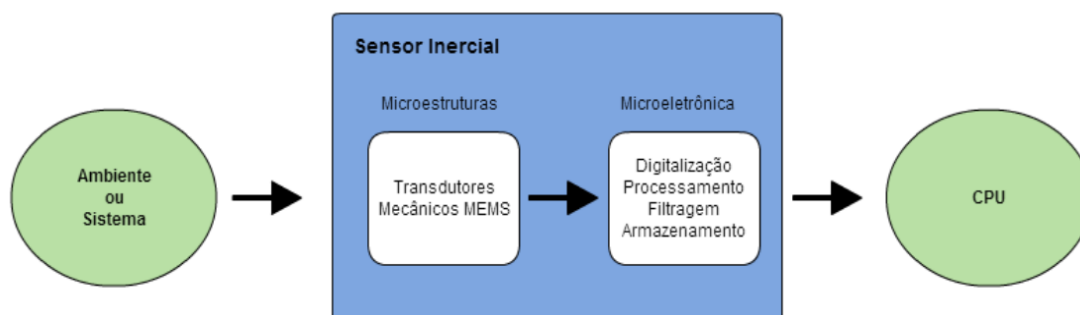


Figura 3

Fonte: CARVALHO(2016)

Conforme o autor,

“Quando o ambiente ou sistema muda suas propriedades os transdutores mecânicos transformam os fenômenos físicos aferidos em um sinal elétrico proporcional. Estes transdutores estão sujeitos a interações com o encapsulamento do circuito integrado, normalmente causando a transferência de calor e tensões mecânicas para o encapsulamento. A recíproca também é verdadeira, de forma que estes fatores do ambiente podem ser transferidos para os transdutores através do encapsulamento, mudando seu comportamento. Posteriormente o sinal elétrico que vem dos transdutores entra em um estágio de amplificação, filtragem, processamento e digitalização do sinal. A eletrônica também deve gerar sinais de controle necessários para configuração e ajuste do funcionamento do sensor. Na prática, a fronteira entre a microeletrônica e os transdutores não é muito bem definida e, frequentemente, estes dois formam um bloco indivisível, onde o estágio de entrada fornece a polarização e excitação necessárias para o transdutor, ou partes da microeletrônica podem atuar como componentes do transdutor.” (CARVALHO, 2016, p. 27)

Os acelerômetros permitem medir a aceleração linear num dada direção em relação a um sistema de referência. Segundo CARVALHO (2016), “uma massa de prova de silício é suspensa e suportada por molas também de silício, conferindo a esta massa uma mobilidade conhecida”. (Figura 4)

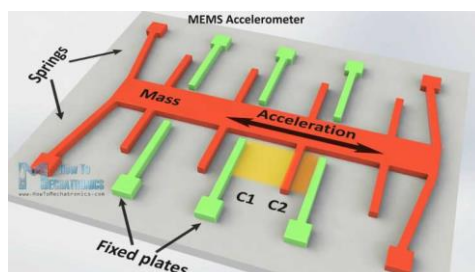


Figura 4

Fonte: <http://howtomechatronics.com/how-it-works/electrical-engineering/mems-accelerometer-gyroscope-magnetometer-arduino/>

Pelo princípio da inércia se o sistema sofre a ação de alguma força esta massa responderá por meio da variação de velocidade alterando as distâncias e correspondente alteração na capacitância entre os eletrodos fixos da massa e os eletrodos fixos do sistema. Para medir estas variações em três eixos, três acelerômetros são embutidos perpendicularmente entre si no dispositivo. (Figura 5)

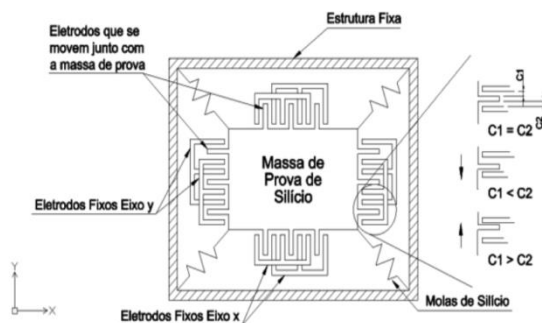


Figura 5

Fonte: CARVALHO (2016) Adaptado de (TORRES, 2016)

Os giroscópios, por sua vez, permitem medir a variação angular. Sua construção é similar ao acelerômetro, entretanto, conforme CARVALHO (2016) a velocidade angular é “obtida medindo-se a força Coriolis exercida na massa vibrante”. Os giroscópios são baseados no princípio de conservação do momento angular, assim, quando o dispositivo é rotacionado, a massa suspensa do giroscópio se desloca em uma certa direção o que acarreta a variação da capacitância entre os eletrodos fixos do sistema e os eletrodos da massa suspensa. (Figura 6)

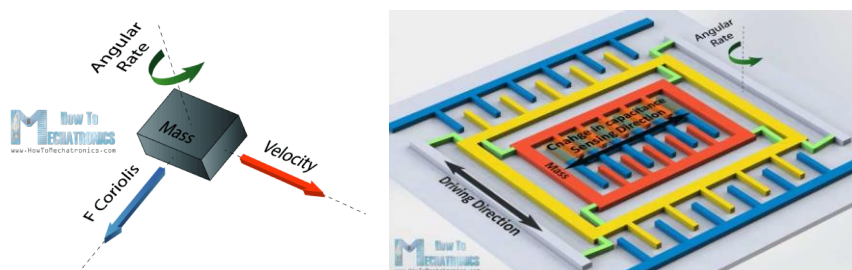


Figura 6

Fonte: <http://howtomechatronics.com/how-it-works/electrical-engineering/mems-accelerometer-gyrocope-magnetometer-arduino/>

Assim como nos acelerômetros para a medição da variação angular em relação a três eixos diferentes são dispostos no dispositivo três giroscópios perpendiculares entre si. A Figura 7, apresenta a estrutura de um giroscópio de um eixo.

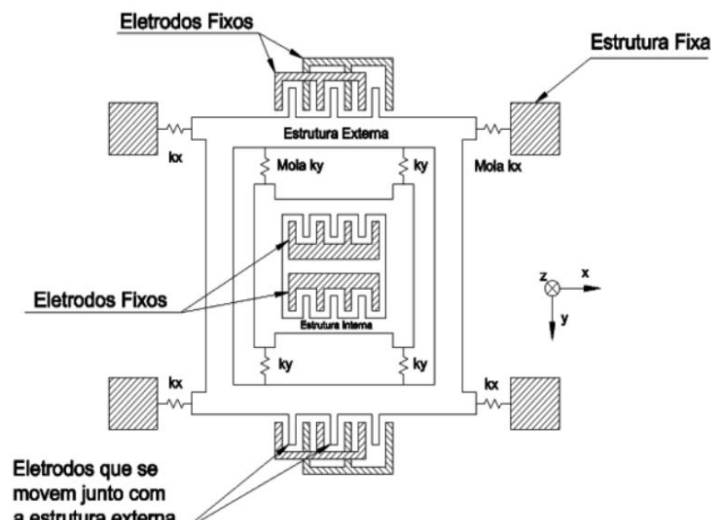


Figura 7

Fonte: CARVALHO (2016) Adaptado de (TORRES, 2016)

Estes dispositivos são muito comuns em *smartphones* e *tablets* e implementados com a função “girar tela”. Neste trabalho pretende-se explorar o sensor triaxial de baixo custo conhecido por MPU 6050, fabricado pela Invensense (Figura 8), cujas dimensões são de 4 X 4 X 0.9 mm. O custo deste sensor embarcado numa placa (*breakboard*) GY-521 é de aproximadamente R\$25,00.

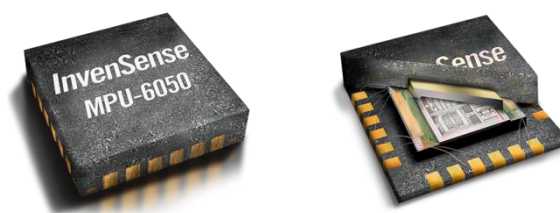


Figura 8

Fonte: <https://www.invensense.com/products/motion-tracking/6-axis/mpu-6050/>

Este sensor contém três acelerômetros e três giroscópios e é utilizado em alguns *smartphones* da Apple e Samsung. Na Figura 9, é apresentado a posição dos IMU's no MPU 6050. Na parte superior da imagem se encontram os acelerômetros e, na inferior, os giroscópios.

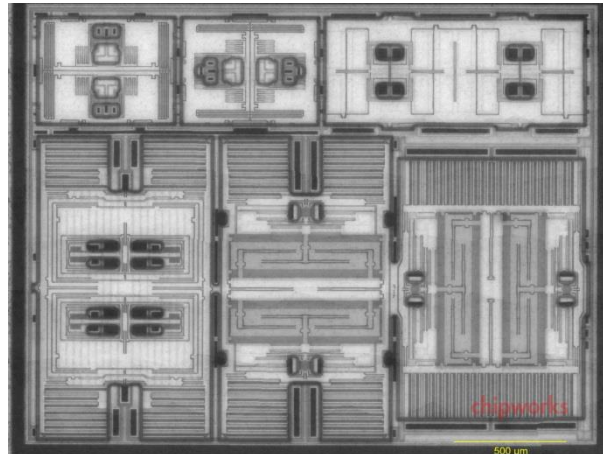


Figura 9

Fonte: <http://selfbalanceboard.blogspot.com.br/>

A obtenção dos dados cinéticos por meios destes sensores inerciais é realizada por meio de um algoritmo de filtro e fusão [11] (Figura 10). A fusão dos dados puros é realizada por meio da sua representação em quatérnios e sua conversão posterior para ângulos de Euler. Já o filtro que possibilita prevenção e correção de erros é uma adaptação do conhecido filtro de Kalman é foi estabelecido por [12].

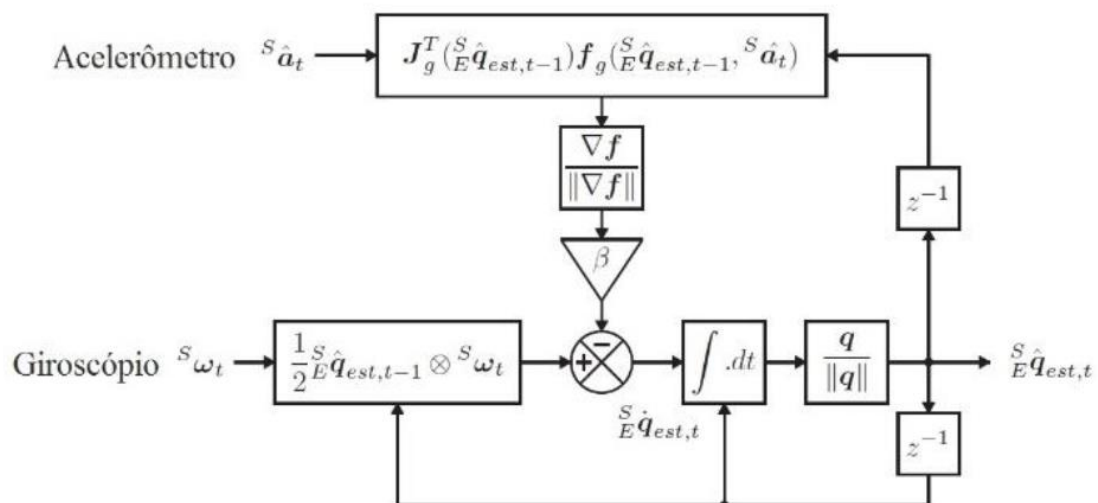


Figura 10

Fonte: (SANTOS, 2016) Adaptado de (MADGWICK; HARRISON; VAIDYANATHAN, 2011)

2. Como é realizada a integração de dispositivos IMU e a plataforma Arduino em sistemas de captura de movimentos?

O Arduino é uma plataforma *hardware open source* para desenvolvimento de projetos eletrônicos [13]. Existem várias versões do Arduino e nesta pesquisa procurou-se trabalhar com o Arduino Mega baseado no microcontrolador Atmega2560. O sensor utilizado foi o MPU 6050 embarcado numa placa GY-521. (Figura 11)

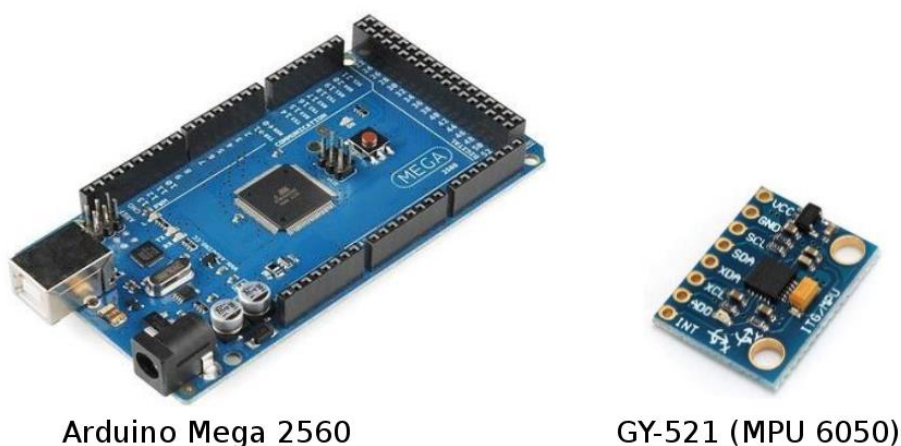


Figura 11

Fonte: Adaptado de BIGOLIN(2016)

A integração do GY-521 com o Arduino é realizada de maneira relativamente simples por meio de um protocolo de comunicação por meio da porta iC2 do Arduino. As conexões devem ser feitas conforme esquema de pinagem bem documentado em sites sobre o assunto na WEB. (Figura 12)

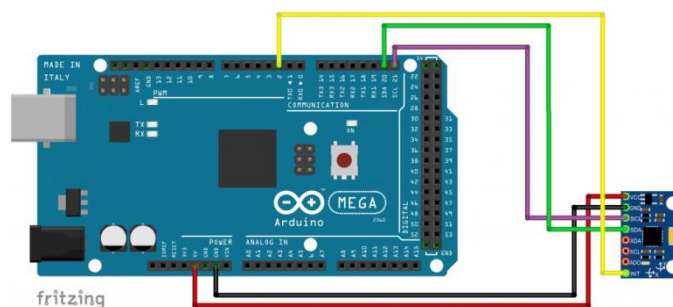


Figura 12

Fonte: <https://www.prometec.net/usando-el-mpu6050/#>

Uma vez estabelecida a conexão entre as placas é necessário carregar o código correspondente e bibliotecas adicionais no Arduino. A programação do Arduino pode ser realizada por meio de uma IDE, interface de desenvolvimento própria disponibilizada gratuitamente no site do próprio Arduino. Os trabalhos analisados não trazem disponibilizavam os códigos tais como necessários para nossa implementação. Entretanto, estes códigos, assim como as respectivas bibliotecas, estão disponibilizadas gratuitamente por desenvolvedores voluntários das comunidades virtuais em torno do Arduino. Um levantamento acerca de códigos disponíveis foi realizado e foram encontrados a seguintes principais referências:

- <https://playground.arduino.cc/Main/MPU-6050>
- <https://github.com/jrowberg/i2cdevlib>
- <http://www.geekmomprojects.com/mpu-6050-dmp-data-from-i2cdevlib/>

A partir dos códigos disponibilizados foi possível implementar um sistema simples para verificação dos dados capturados. Algumas adaptações tiveram que ser realizadas para a implementação dos códigos em ambiente Linux.

3. Como foi realizada a visualização dos dados capturados?

Uma etapa fundamental neste projeto diz respeito a visualização dos dados capturados pelo sistema. As interfaces gráficas para a visualização de dados apresentadas nos trabalhos analisados foram desenvolvidas com objetivos e em linguagens de programação diferentes. Em termos dos objetivos pode-se agrupar os trabalhos em duas classes: visualização dos dados cinemáticos por meio gráficos 2D ([14]□[15]□) e por meio de representação tridimensional de modelo geométrico simples[16]□[17]□, ou armadura, representação estilizada da estrutura óssea[10]□[18]□. As linguagens de programação utilizadas também variaram entre os trabalhos, dentre as quais identificamos as principais: Matlab ([19], [20]□), Labview ([21]□[22]□[18]□). Em outros trabalhos que não foram selecionados para esta análise foi possível identificar a utilização de outras linguagens como Java, C e Python.

4. Quais as vantagens e desvantagens encontradas em relação a utilização destes dispositivos?

Embora os trabalhos destaquem as vantagens na utilização do MPU 6050 para a captura de dados do movimento humano com as vantagens já citadas em relação aos sistemas inerciais. Alguns problemas foram encontrados em relação a este sensor específico como por exemplo:

- A produção de ruídos advinda dos sensores devido a sua grande sensibilidade e que são decorrente de interferências externas, o que exige a utilização filtros complementares ([16]).
- A necessidade da inclusão de um sensor como o magnetômetro para a produção correta dos dados relativos a rotação em torno do eixo Z, ou seja, a adoção de um sensor com 9 graus de liberdade, ao invés, dos 6 graus de liberdade do MPU 6050.[23]

CONCLUSÃO

Neste trabalho procurou-se fazer um levantamento acerca da utilização de sensores baseados em IMU para a construção de um sistema de captura de movimentos da marcha humana. Os trabalhos analisados mostraram que a utilização de sistemas inerciais é promissora em termos do seu baixo custo e acurácia. Entretanto, alguns problemas podem ocorrer dada a natureza destes sensores, como a grande sensibilidade que acaba introduzindo ruídos nos dados capturados. Um sistema de captura de dados já está em estudo e esperamos num trabalho futuro comparar os resultados obtidos com aqueles presentes na literatura analisada.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos o apoio do Grupo de Pesquisa em Engenharia Mecânica do Centro Universitário Autônomo do Brasil pelo suporte as atividades que permitem que este projeto esteja sendo realizado.

Referências

- [1] M. Field, Z. Pan, D. Stirling, and F. Naghdy, "Human motion capture sensors and analysis in robotics," *Ind. Robot An Int. J.*, vol. 38, no. 2, pp. 163–171, 2011.
- [2] M. Saad, L. R. Battistella, and D. Masiero, "Técnicas de Análise de Marcha," *Acta Fisiátrica*, vol. 3(2), pp. 23–26, 1996.
- [3] L. Velho and F. W. da Silva, "Um sistema de Animacao Baseado em Movimento Capturado," 1998.
- [4] T. P. Andriacchi and E. J. Alexander, "Studies of human locomotion: past, present and future," *J. Biomech.*, vol. 33, no. 10, pp. 1217–1224, 2000.
- [5] A. J. THURSTON, "Giovanni Borelli and the Study of Human Movement : an Historical Review," *Aust. N. Z. J. Surg.*, vol. 69, no. 4, pp. 276–288, 1999.
- [6] C. P. de F. M. Barbosa, "Modelação biomecânica do corpo humano : aplicação na análise da marcha.," 2011.
- [7] K. Sukhomlina, "Humanoid Motion Capture," no. May, pp. 1–55, 2014.
- [8] P. Nogueira, "Motion capture fundamentals," 2011.
- [9] M. Schwartz and J. Park, "Arduino Guide using MPU-6050 and nRF24L01," 2015.
- [10] E. M. Carvalho, "Protótipo de um dispositivo para captura de movimentos dos membros superiores em tempo real usando sensores inerciais," 2016.
- [11] C. P. Santos, M. E. M. Vieira, and S. L. S. Jr, "Sensores inerciais aplicados à marcha humana no esporte," *SEA-Seminário Eletrônica e Automação Ponta Grossa / 2016*, no. September, 2016.
- [12] S. O. H. Madgwick, A. J. L. Harrison, and R. Vaidyanathan, "Estimation of IMU and MARG orientation using a gradient descent algorithm," *IEEE Int. Conf. Rehabil. Robot.*, pp. 179–185, 2011.

- [13] L. Bigolin, “Sistemas inerciais para acelerometria e uso em medições de vci,” 2016.
- [14] D. F. T. Pineda, Diseño e implementación de un sistema para visualizar la marcha humana biomecánica en la afectación de rodilla ante una gonartrosis, 2017.
- [15] A. F. N. Gomes, J. Gabriel, and J. M. R. S. Tavares, “Igrafbiotenist – interface gráfica de monitorização biomecânica de tenistas,” pp. 1–9, 2015.
- [16] L. Meneguzzi, M. M. Cendron, R. Fritzen, T. Identifica, and O. I. Videira, “Utilização de giroscópio e acelerômetro para identificação de movimentação em ambientes tridimensionais,” 2016.
- [17] K. Batista, “Integração entre sistema embarcado e gráfico para análise de trajeto,” *Rev. Eletrônica Multidiscip. FACEAR*.
- [18] J. D. B. Iñiguez, “Diseño, construcción e implementación de un sistema de captura de movimiento para análisis ergonómico de riesgo laboral de extremidades superiores,” p. 113, 2014.
- [19] G. T. Perry, A. Becker, and G. Marins, “Design de wearables para uso esportivo: sensores inerciais aplicados à natação em piscinas,” *12 P&D 2016 Congr. Bras. Pesqui. e Desenvolv. em Des.*, 2016.
- [20] J. J. da Cruz, A. A. Ferreira, and J. B. O. Jr, “Desenvolvimento de uma unidade de medida inercial com sistema digital de aquisição de dados em tempo real.”
- [21] A. F. N. Gomes, J. G. Mendes, and J. M. R. S. Tavares, “Sabiotenist – Sistema De Análise Biomecânica De Tenistas,” pp. 6–7, 2015.
- [22] A. G. de La Fuente, “Desarrollo de un dispositivo háptico con reflexion de esfuerzos y con percepcion inercial y proximidad.”
- [23] R. S. Moura, “Desenvolvimento de um Sistema de Orientação Espacial Inercial,” p. 150, 2013.