



Universidade do Estado do Rio de Janeiro

Centro de Tecnologia e Ciências

Escola Superior de Desenho Industrial

Priscilla Streit

**Comparação de parâmetros biomecânicos entre sistemas de captura de
movimentos: avaliação do Microsoft Kinect**

Rio de Janeiro

2013

Priscilla Streit

**Comparação de parâmetros biomecânicos entre sistemas de captura de movimentos:
avaliação do Microsoft Kinect**

Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-graduação em Design, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro.

Orientador: Prof. Dr. André Soares Monat

Rio de Janeiro

2013

CATALOGAÇÃO NA FONTE
UERJ/REDE SIRIUS/BIBLIOTECA CTC/G

S915 Streit, Priscilla.

Comparação de parâmetros biomecânicos entre sistemas de captura de movimentos: avaliação do Microsoft Kinect / Priscilla Streit. - 2013. 140f. : il.

Orientador: Andre Soares Monat.

Dissertação (Mestrado). Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Escola Superior de Desenho Industrial.

1. Biomecânica - Teses. 2. Ergonomia - Teses. 3. Movimentos - Teses. 4. Vídeo games. I. Monat, André Soares. II. Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Escola Superior de Desenho Industrial. III. Título.

CDU 621.76

Autorizo, apenas para fins acadêmicos e científicos, a reprodução total ou parcial desta dissertação, desde que citada a fonte.

Assinatura

Data

Priscilla Streit

**Comparação de parâmetros biomecânicos entre sistemas de captura de movimentos:
avaliação do Microsoft Kinect**

Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-graduação em Design, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro.

Aprovada em 13 de novembro de 2013.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. André Soares Monat (Orientador)

Escola Superior de Desenho Industrial da UERJ

Prof. Dr. Sydney Fernandes de Freitas

Escola Superior de Desenho Industrial da UERJ

Prof. Dr. João Carlos Lutz Barbosa

Universidade Federal Fluminense - UFF

Rio de Janeiro

2013

RESUMO

STREIT, Priscilla. *Comparação de parâmetros biomecânicos entre sistemas de captura de movimentos: avaliação do Microsoft Kinect*. 2013. 140f. Dissertação. (Mestrado em Design) – Escola Superior de Desenho Industrial, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.

O objetivo do presente trabalho foi avaliar comparativamente parâmetros biomecânicos (tanto antropométricos, quanto cinemáticos) de dados obtidos a partir do console Microsoft Kinect (2010). A avaliação destes parâmetros foi realizada para validar seu uso para obter informações complementares à Análise Ergonomica do Trabalho (AET) e em outras pesquisas, cujos objetivos envolvem o diagnóstico de uso de produtos ou ambientes de trabalho a partir das análises posturais e interações da população que o utiliza.

A pesquisa com este console em particular é justificada uma vez que seu lançamento modificou o cenário da biomecânica, já que se trata de um equipamento acessível e portátil. Porém, sua precisão em relação a outros equipamentos ainda está em aberto, sendo inclusive, objeto de estudo de muitas pesquisas em andamento.

Os dados obtidos por meio de sistemas de captura de movimentos tridimensionais permitem a avaliação de produtos, atividades e análises de interações homem-objeto. No campo do Design, é uma importante realização, uma vez que permite que profissionais tenham acesso à ferramenta que, anteriormente, era limitada a nichos especializados.

O console foi comparado com o sistema de captura de movimentos inercial MVN Biomech (XSENS TECHNOLOGIES) e com o tradicional registro por meio de vídeo. Para obter dados do console Kinect, um software disponível no mercado foi selecionado a partir de critérios predefinidos para obter dados cinemáticos do console.

Dois experimentos laboratoriais foram realizados: o primeiro, teve como objetivo obter dados operacionais dos equipamentos e suas limitações de uso; e o segundo foi realizado de forma a obter dados biomecânicos e compará-los a partir de três parâmetros estáticos e um dinâmico. Os parâmetros estáticos envolveram ângulos articulares e segmentares em posturas selecionadas e dimensões segmentares, onde a proposta foi avaliar dados antropométricos e as características do modelo biomecânico referente à manter os corpos rígidos durante a movimentação. O parâmetro dinâmico foi realizado de forma a obter dados de deslocamento global das articulações em movimentações selecionadas.

Para possibilitar esta análise, uma plataforma digital foi desenvolvida, constituindo um campo neutro para o tratamento dos dados. A plataforma mantém os dados originais dos sistemas, permitindo a distinção entre os modelos biomecânicos e a retirada de dados que possam ser comparados.

Os experimentos realizados permitiram avaliar a usabilidade do console, fornecendo diretrizes para seu uso. Para avaliar a utilização do console em ambientes reais de trabalho, foram realizados registros preliminares em laboratórios químicos, os quais se mostraram viáveis se as limitações, semelhantes às de sistemas baseados em tecnologia ótica, sejam consideradas. Futuras análises devem ser conduzidas para validar estatisticamente os resultados obtidos. Porém, considerando o objetivo do trabalho, pode-se concluir que o sistema avaliado é uma alternativa confiável no contexto proposto.

Palavras-chave: Biomecânica. Ergonomia. Sistemas de Captura de Movimentos. MS Kinect

ABSTRACT

STREIT, Priscilla. *Comparison of biomechanical parameters between motion capture systems: Microsoft Kinect evaluation*. 2013. 140f. Dissertação. (Mestrado em Design) – Escola Superior de Desenho Industrial, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.

The aim of the present study was to evaluate biomechanical parameters (both, anthropometric and kinematic) from data acquired through Microsoft Kinect (2010). The validation of its biomechanical characteristics will allow its use in gathering information to complement Ergonomic Work Analysis (EWA) and other user researches that provide product and work environment diagnosis through postural and dynamic assessment.

The use of MS Kinect in this research is justified by the fact that it has changed biomechanical scenario due to the fact that it is an inexpensive and portable alternative to the available motion capture systems available in the market. However, its accuracy has been the subject of many ongoing researches

Data acquired from 3D motion capture systems provide means for evaluating products, activities and human-object interactions. In Design, it's an important achievement, since it allows professionals to use the tool, considering that most motion capture systems available in the market are not accessible.

The Microsoft console was compared to MVN Biomech inertial system (XSENS TECHNOLOGIES) and traditional 2D video data. In order to acquire kinematic data from MS Kinect, a software was chosen, following a few criteria.

Two laboratorial experiments were held, where the first aimed to acquire operational details and limitations from the equipments, as for the second aimed to compare biomechanical data through three static parameters and one dynamic. The static parameters involved joint and segment angles, as well as a segments dimensional comparison, whereas the proposals were to assess anthropometric features and to understand if the biomechanical model considers the segments as rigid bodies. The dynamic comparison was based on joints global displacement in selected movements.

In order to analyze data from different systems, a digital platform based on a game engine was developed, constituting an even ground for evaluation. The platform maintains original data from the biomechanical models and extracts kinematic parameters, which can be compared.

The experiments have provided understanding on the console's operations, providing guidelines for its usage. In order to also evaluate its usage in real work environments, trial recordings were held in chemical laboratories. These trials have shown the alternative to be viable if the limitations, similar to optical systems', are considered. Future analyses should be conducted in order to statistically validate the results. However, given the goals and context of this research, it can be concluded that the evaluated system is a reliable motion capture alternative.

Keywords: Biomechanics. Ergonomics. Motion Capture Systems. MS Kinect

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 –	Definição dos planos ortogonais em relação à postura de referência.....	23
Figura 2 –	Representação dos movimentos articulares dos membros inferiores.....	24
Figura 3 –	Representação da articulação do ombro e seu modelo simplificado em diferentes momentos.....	30
Figura 4 –	Do trabalho “Animal Locomotion”, Plate 65, de Eadweard Muybridge, 1887.....	33
Figura 5 –	Etienne-Jules Marey. Vestimenta preta com marcadores brancos e resultado gerado pela exposição em contraste.....	34
Figura 6 –	Experimento de Inman e Eberhart utilizando luz interrompida para estudo cinemático.....	35
Figura 7 –	Representação do sensor inercial.....	41
Figura 8 –	Simulador virtual de ambientes de trabalho.....	44
Figura 9 –	Trajectoria nos eixos XYZ do cotovelo direito obtidas a partir do sistema ótico OptiTrack e do console Kinect.....	46
Figura 10 –	Configuração do console MS Kinect.....	51
Figura 11 –	Pose T com dimensões dos segmentos corporais e seus pontos anatômicos.....	55
Figura 12 –	Posições adotadas para calibragem do sistema MVN Biomech.....	55
Figura 13 –	Alternativas de posicionamento dos consoles Kinect e suas respectivas áreas de captura.....	57
Figura 14 –	Primeira versão da Plataforma Digital.....	61
Figura 15 –	Gráficos obtidos a partir da primeira versão da plataforma.....	62
Figura 16 –	Hierarquia do modelo biomecânico gerado pelo sistema inercial MVN Biomech.	65
Figura 17 –	Hierarquia do modelo biomecânico gerado pelo sistema iPiSoft/Kinect	66
Figura 18 –	Principais diferenças entre os modelos biomecânicos MVN Biomech e iPiSoft/Kinect.....	68
Figura 19 –	Representação do método de extração da inclinação do tronco.....	73

Figura 20 – Representação do posicionamento dos sistemas óticos.....	80
Figura 21 – Representação das cenas estáticas	83
Figura 22 – Projeção dos modelos biomecânicos no plano sagital.....	105
Figura 23 – Representação dos ângulos articulares extraídos dos modelos 3D.....	109

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 –	Deslocamento do ombro direito durante adução horizontal.....	85
Gráfico 2 –	Deslocamento do ombro esquerdo durante adução horizontal.....	86
Gráfico 3 –	Deslocamento do cotovelo direito durante adução horizontal.....	87
Gráfico 4 –	Deslocamento do cotovelo esquerdo durante adução horizontal.....	88
Gráfico 5 –	Deslocamento do punho direito durante adução horizontal.....	89
Gráfico 6 –	Deslocamento do punho esquerdo durante adução horizontal.....	90
Gráfico 7 –	Deslocamento do ombro direito durante adução.....	91
Gráfico 8 –	Deslocamento do ombro esquerdo durante adução.....	92
Gráfico 9 –	Deslocamento do cotovelo direito durante adução.....	93
Gráfico 10 –	Deslocamento do cotovelo esquerdo durante adução.....	94
Gráfico 11 –	Deslocamento do punho direito durante adução.....	95
Gráfico 12 –	Deslocamento do punho esquerdo durante adução.....	96
Gráfico 13 –	Deslocamento do quadril direito durante flexão.....	97
Gráfico 14 –	Deslocamento do quadril esquerdo durante flexão.....	98
Gráfico 15 –	Deslocamento do joelho direito durante flexão.....	99
Gráfico 16 –	Deslocamento do joelho esquerdo durante flexão.....	100
Gráfico 17 –	Deslocamento do calcanhar direito durante flexão.....	101
Gráfico 18 –	Deslocamento do calcanhar esquerdo durante flexão.....	102
Gráfico 19 –	Representação da comparação do ângulo articular do joelho direito no plano sagital referentes às cenas 1 – 4.....	106
Gráfico 20 –	Representação da comparação do ângulo articular do punho direito no plano sagital referentes às cenas 1 – 4.....	107
Gráfico 21 –	Representação da comparação do ângulo articular do cotovelo direito no plano sagital referentes às cenas 1 – 4.....	108
Gráfico 22 –	Representação da comparação do ângulo articular do joelho direito.....	111

Gráfico 23 –	Representação da comparação do ângulo articular do joelho esquerdo.....	112
Gráfico 24 –	Representação da comparação do ângulo articular do cotovelo direito.....	113
Gráfico 25 –	Representação da comparação do ângulo articular do cotovelo esquerdo...	114
Gráfico 26 –	Representação da comparação do ângulo articular do punho direito.....	115
Gráfico 27 -	Representação da comparação do ângulo articular do punho esquerdo.....	116
Gráfico 28 -	Representação da comparação das inclinações da mão direita.....	117
Gráfico 29 –	Representação da comparação das inclinações da mão esquerda.....	118
Gráfico 30 –	Representação da comparação das inclinações do antebraço direito.....	119
Gráfico 31 –	Representação da comparação das inclinações do antebraço esquerdo.....	120
Gráfico 32 –	Representação da comparação das inclinações do braço direito.....	121
Gráfico 33 –	Representação da comparação das inclinações do braço esquerdo.....	122
Gráfico 34 –	Representação da comparação das inclinações da perna direita.....	123
Gráfico 35 –	Representação da comparação das inclinações do perna esquerda.....	124
Gráfico 36 –	Representação da comparação das inclinações da coxa direita.....	125
Gráfico 37 –	Representação da comparação das inclinações da coxa esquerda.....	126

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 –	Relação das medidas comparadas e definições de extração.....	70
Tabela 2 –	Resultados comparativos de medidas segmentares nas cenas estáticas selecionadas, obtidas pelo sistema inercial MVN Biomech. As medidas segmentares foram retiradas em cm.....	103
Tabela 3 –	Resultados comparativos de medidas segmentares nas cenas estáticas selecionadas, obtidas pelo Kinect através do iPiSoft. As medidas segmentares foram retiradas em cm.....	103
Tabela 4 –	Comparação dimensional segmentar entre os sistemas e as medidas reais do voluntário, onde “MVN” se refere ao sistema inercial; “Kinect” se refere ao console através do iPiSoft; “V1” se refere à variação percentual do sistema inercial em relação às medidas reais; “V2” se refere à variação percentual do MS Kinect através do iPiSoft em relação às medidas reais; “D1” e “D2” se referem às variações absolutas no dimensionamento. Sinais negativos se referem à segmentos menores que as medidas reais.....	104
Tabela 5 –	Comparação de ângulos segmentares utilizando os dados 2D obtidos por meio de registro por vídeo. Os valores estão em graus e apenas as articulações com predominância no plano sagital referentes ao lado direito do corpo foram levantadas.....	106
Tabela 6 –	Ângulos articulares retirados a partir da reconstrução do modelo biomecânico do MS Kinect através do iPiSoft nas 5 cenas estáticas selecionadas.....	110
Tabela 7 –	Ângulos articulares retirados a partir da reconstrução do modelo biomecânico do MVN Biomech nas 5 cenas estáticas selecionadas.....	110
Tabela 8 –	Variação da inclinação do tronco com base na ISO 11266 entre os sistemas 3D nas 4 posturas estáticas selecionadas.....	127
Tabela 9	Vantagens e desvantagens no uso do sistema iPiSoft – Kinect com base nos experimentos realizados.....	131

SUMÁRIO

	INTRODUÇÃO	13
1	ERGONOMIA E DESIGN: ASPECTOS INTERDISCIPLINARES EM PROJETO	17
1.1	A Ergonomia no Brasil	17
1.2	Análise Ergonômica do Trabalho	18
1.3	Biomecânica	20
1.3.1	<u>Sistema de referências</u>	22
1.3.2	<u>Antropometria</u>	25
1.3.3	<u>Cinemática</u>	26
1.3.4	<u>Modelos Biomecânicos</u>	29
2	SISTEMAS DE CAPTURA DE MOVIMENTOS	32
2.1	Definição e histórico	32
2.2	Tecnologias	38
2.3	Aplicações em projeto: Modelos Humanos Digitais	43
2.4	Estudos comparativos	44
3	MATERIAIS E MÉTODOS	49
3.1	Os sistemas de captura de movimentos avaliados	49
3.2	Obtenção dos dados	53
3.3	Análise dos dados	60
3.3.1	<u>Plataforma Digital 3D</u>	60
3.3.2	<u>Os modelos biomecânicos</u>	63
3.3.3	<u>Comparação dinâmica</u>	69
3.3.4	<u>Comparações estáticas</u>	69
4	EXPERIMENTOS	75
4.1	Experimento piloto	75
4.1.1	<u>Obtenção dos dados</u>	76
4.1.2	<u>Análise dos dados</u>	77
4.1.3	<u>Resultados</u>	78
4.2	Experimento 2	78
4.2.1	<u>Obtenção dos dados</u>	79
4.2.2	<u>Análise dos dados</u>	82

4.2.3	<u>Resultados</u>	84
5	DISCUSSÃO	128
5.1	Avaliação dos sistemas em ambientes reais de trabalho	129
	CONCLUSÃO	131
	REFERÊNCIAS	133

INTRODUÇÃO

O presente trabalho foi desenvolvido de forma a complementar a metodologia já existente no Laboratório de Ergonomia do Instituto Nacional de Tecnologia. A Análise Ergonômica do Trabalho vem sendo aplicada em ambientes de trabalho do setor de petróleo, gás e energia com o objetivo de reformular laboratórios com base na análise da situação existente. A partir de recomendações ergonômicas, normas técnicas e, principalmente, a participação de todos envolvidos, o projeto dos ambientes é democratizado a partir da ferramenta de simulação digital 3D.

O desenvolvimento da ferramenta de simulação utiliza Modelos Humanos Digitais com base nos dados volumétricos de cada trabalhador - adquiridos por meio de escaneamento 3D a laser, aliados à sua captura de movimentos por meio de sensores inerciais durante as atividades. A utilização dos modelos em questão permite a avaliação das posturas adotadas durante a realização das atividades, assim como a determinação de alcances e a realização estudos de ocupação utilizando o volume e deslocamento da população que efetivamente utiliza os ambientes.

Dessa forma, é possível adequar a configuração dos ambientes de trabalho e projetar produtos e ferramentas que auxiliem a realização das atividades de forma a evitar desconfortos ou doenças ocupacionais e, como consequência, aumentar a produtividade.

Modelar o movimento humano é uma tarefa complexa, não só devido à quantidade de articulações e musculaturas móveis a serem idealizadas, mas principalmente uma vez que cada indivíduo tem movimentos característicos próprios. (HODGINS et al. 1995) A marcha humana é reconhecida como uma forma de identificador biométrico, uma vez que cada uma de nossas dimensões corporais diferem umas das outras e ditam a forma de pela qual nos movemos (CHAMBERLAIN, 2009).

Pessoas estão ao nosso redor. [...] Sua presença e suas ações podem ser reparadas ou ignoradas, apreciadas ou desprezadas, analisadas ou prescritas. A própria ubiquidade das outras pessoas nas nossas vidas é um desafio torturante para o modelador computacional: pessoas são, os objetos de interesse mais comuns e, ao mesmo tempo, os mais complexos estruturalmente. Seus movimentos cotidianos são incrivelmente fluidos, ainda sim, exigentes em tempos de reprodução, com ações conduzidas não apenas pelos aspectos mecânicos dos músculos e ossos, mas também de forma cognitiva através de suas intenções e crenças. Nosso sistema motor consegue nos mover sem nos deixar o fardo, ou o prazer, de sabermos como o fizemos.¹ (BADLER; PHILIPS; WEBER. 1999, tradução do autor)

¹ Texto em língua estrangeira: "People are all around us. [...] Their presence and actions are note dor ignores, enjoyed or disdained, analyzed or prescribed. The very ubiquitousness of other people in our lives poses a tantalizing challenge to the computational modeler: people are a tone the most common object of interest and yet the most structurally complex. Their everyday movements are amazingly fluid yet demanding to reproduce, with actions driven not Just mechanically by muscles and bonés, but also cognitively by beliefs and intentions. Out motor systems manage to learn how to make us move without leaving us the burden or pleasure of knowing how we did it."

Conhecer e avaliar características cinemáticas serve como ferramenta para entender como indivíduos ou populações interagem com o seu ambiente, com os objetos e também avaliar posturas e alcances em ambientes de trabalho. Pode ser feito um paralelo desta ferramenta com a antropometria, que fornece as informações dimensionais destas populações. Estes meios, como métodos de medição biomecânicas, são justificativas para os próprios fins, uma vez que fornecem subsídios para o projeto de novos produtos, situações ou sistemas, cujo o homem e a maneira como trabalha são considerados pontos de partida.

Os dados obtidos a partir de sistemas de captura de movimentos são utilizados em aplicações que permeiam, desde o mercado de entretenimento – em filmes e jogos, à construção de Modelos Humanos Digitais² para aplicação em projetos e pesquisas. Estes, permitem a representação de aspectos humanos, podendo ser utilizados em diversas áreas do conhecimento.

Badler (1997) argumenta que no campo do design e da engenharia, os Modelos Humanos Digitais vem sendo aplicados em avaliações de produtos, veículos, áreas de trabalho, ferramentas e linhas de produção. Outros campos de aplicação são colocados por Yang (2009), e compreendem desde a avaliação de performance em esportes e reabilitação física à utilização em pesquisas militares.

Com o aumento das capacidades dos computadores, a ergonomia assistida por computadores oferece novas possibilidades para integrar o conhecimento convencional em ergonomia e desenvolver novos métodos no processo de design (MA et al. 2011). Para Chaffin (2007), a utilização de simulações computadorizadas do movimento humano permite prever muitos dos adversos estresses musculoesqueléticos no design de futuros ambientes de trabalho. Porém, ainda existe uma grande necessidade de estudar e registrar o que indivíduos podem realizar de forma segura.

Com o foco apenas no aspecto do movimento, a maior parte das empresas que fabricam Modelos Humanos Digitais utilizam cinemática inversa, o que Chaffin et al (1999) argumentam como “não sendo biomecanicamente sofisticado, podendo resultar em posturas errôneas”³. Pode-se observar, dentre as pesquisas em desenvolvimento atualmente⁴, tentativas

² Modelos Humanos Digitais são representações geradas por computador de seres humanos utilizados em projetos auxiliados por computador ou programas similares. (WORLDSTAD, JC. Digital Human Models for Ergonomics. University of Nebraska – Lincoln. 2000, tradução do autor. O texto em língua estrangeira é: “Digital human models in the context of this section are computer-generated representations of human beings used in computer-aided design (CAD) or similar programs”)

³ Texto em língua estrangeira: these IK methods may not be very biomechanically sophisticated, however, and can result in erroneous postures being chosen.

⁴ CMU Graphics Lab Motion Capture Database. Carnegie Mellon University Motion Capture Database. Disponível em[<http://mocap.cs.cmu.edu>].

de criar banco de dados e de previsão de movimento para estas aplicações e outras aplicações. No entanto, ainda não se chegou a uma solução viável e fiel à realidade no sentido de replicar comportamentos individuais em grande escala. Sendo assim, a alternativa é investigar casos específicos, buscando melhorias pontuais.

O sistema de captura de movimentos utilizado para registrar as atividades de trabalho atualmente no Laboratório de Ergonomia (DvDI/INT) é baseado em sensores inerciais e, embora possua alto nível de precisão em relação aos dados capturados, possui algumas limitações, além de ser relativamente caro.

Até o ano de 2010, os sistemas de captura de movimentos existentes no mercado eram limitados à nichos, uma vez que exigiam alto poder aquisitivo. Este panorama foi alterado com o lançamento do console Kinect⁵, da Microsoft. O console, equipado com uma câmera RGB, dois sensores de profundidade e microfones embutidos, introduziu ao mercado um sistema de captura de movimentos acessível, não invasivo e aberto.

Durante o decorrer desta pesquisa, inclusive, o impacto gerado pelo console pode ser observado mediante o número de publicações e pesquisas emergentes buscando validar o equipamento em critérios biomecânicos de precisão e confiabilidade nos dados obtidos⁶.

O objetivo do presente trabalho, portanto, foi avaliar comparativamente parâmetros biomecânicos do console lançado pela Microsoft, visando validar seu uso para obter dados complementares à Análise Ergonômica do Trabalho (AET). O campo de estudo da Biomecânica é proposto neste estudo uma vez que permite a avaliação de parâmetros cinemáticos e antropométricos do movimento humano, permitindo a validação da precisão dos dados obtidos através do sistema.

Foi criada uma plataforma para democratizar as informações obtidas pelos sistemas, constituindo um campo neutro para comparação. Dois experimentos controlados e um estudo de caso foram realizados, onde as limitações e os vantagens do uso do MS Kinect foram levantados. Os resultados obtidos por meio de comparações angulares, segmentares e de deslocamento mostraram que, em termos de precisão, o console é uma alternativa viável como sistema de captura de movimentos, contanto que sua utilização siga certos critérios.

⁵ Microsoft Kinect. Microsoft. 2010.

⁶ BONNECHÈRE B., et al. 2013; MC QUADE, K.J., et al. 2013. ROBINSON, M.; PARKINSON, M.B. 2013; HAN, S.; LEE, S.; ARMSTRONG, T.J. 2013. STEPHANS, A. 2013. FAMAHEY, I. et al. 2013. BUYS, K. et al. 2013. SEUNG-KOOK, J. et al. 2013. YOU, Y. et al. 2013.

Esta dissertação compreende um total de dois capítulos teóricos e três práticos, os quais podem ser observados resumidamente abaixo:

No **capítulo primeiro**, serão abordados conceitos ergonômicos e sua ligação com o Desenho Industrial e a metodologia da Análise Ergonômica do Trabalho. Em seguida, será feito um aprofundamento em Biomecânica no que concernem as ferramentas para avaliar aspectos cinemáticos e antropométricos.

O **capítulo dois** abordará os sistemas de captura de movimentos, onde será feito um breve levantamento histórico até os tempos atuais, expondo os sistemas existentes e estado da arte, assim como aplicações. Também será feito um levantamento relacionado aos comparativos entre sistemas.

O **capítulo três** compreende os métodos utilizados na seção prática da pesquisa. Os sistemas utilizados serão expostos, seguidos pelo seu detalhamento funcional em relação à obtenção, tratamento e análise dos dados.

No **capítulo quatro**, serão expostos os dois experimentos realizados, os dados obtidos e seus respectivos resultados. O primeiro teve como objetivo obter dados funcionais dos sistemas operando em conjunto; enquanto o segundo foi realizado para obter dados cinemáticos e antropométricos válidos para comparação dos parâmetros biomecânicos. Os resultados do primeiro experimento forneceram diretrizes para a realização do segundo experimento, cujos resultados se mostraram positivos dentro do objetivo da pesquisa.

O **capítulo cinco** compreende a discussão gerada a partir da comparação dos dados obtidos pelos sistemas.

Por último, o trabalho será concluído, onde recomendações e limitações serão discutidas, assim como perspectivas de trabalhos futuros.

1 ERGONOMIA E DESIGN: ASPECTOS INTERDISCIPLINARES EM PROJETO

1.1 A Ergonomia no Brasil

Os primeiros registros da ascensão da ergonomia no Brasil datam dos anos 1960, na Escola Politécnica da USP. Na mesma década, também surge o ensino em Desenho Industrial do país, com a criação da Escola de Desenho Industrial (ESDI/UERJ). No Rio de Janeiro, o foco inicial em ergonomia se deu na COPPE/UFRJ, com a vinda de Itiro Iida da USP, em 1970. Após uma experiência bem sucedida de Iida lecionando na ESDI, a ergonomia foi inserida como disciplina nos cursos de Desenho Industrial. Em 1979, durante a discussão de um novo currículo mínimo ocorrida durante o 1º ENDI - Encontro Nacional de Desenho Industrial, no Rio de Janeiro, a disciplina tornou-se obrigatória. Esta obrigatoriedade foi aprovada pelo Conselho Federal de Educação em 1987 (MORAES, SOARES, 1989).

Este breve panorama foi aqui exposto para demonstrar que a chegada da ergonomia, tanto no país, quanto como disciplina obrigatória nos cursos de Desenho Industrial é recente.

Brevemente definindo seus objetivos, de forma a explicitar seu aspecto multidisciplinar, para Grandjean (1998), a ergonomia pode ser definida como “a ciência da configuração das ferramentas, das máquinas e do ambiente de trabalho”, tendo como objetivo a “adequação das condições de trabalho às capacidades e realidades da pessoa que trabalha”. Da mesma forma para Noulain (1992), seu objetivo está em “contribuir para a concepção ou a transformação das situações de trabalho [...], a fim de que o trabalho possa ser realizado respeitando a saúde e segurança dos homens e com o máximo de conforto e eficácia”⁷ Para Iida (1990), compreende o “estudo do relacionamento entre o homem e seu trabalho, equipamento e ambiente e, particularmente, a aplicação dos conceitos de anatomia, fisiologia e psicologia na solução dos problemas surgidos desse relacionamento”. Couto (1995) a coloca como um “conjunto de ciências e tecnologias que procura a adaptação confortável e produtiva entre o ser humano e seu trabalho, basicamente procurando adaptar as condições de trabalho às características do ser humano.”

Pode-se afirmar, portanto, que a ergonomia como agente de concepção, adequação e melhorias das situações de trabalho, engloba diversos campos do conhecimento humano. O

⁷ NOULIN, M. *Ergonomie*. Paris, Techniplus. 1992.

design - assim como a engenharia e arquitetura, é aquele que concretiza, e é de suma importância a consideração dos aspectos humanos neste processo.

Não existe uma categoria profissional capaz de dar uma solução ergonômica completa de maneira que engenheiros, médicos, professores de educação física, arquitetos, psicólogos, nutricionistas, etc. podem ser observados trabalhando em projetos comuns (AÑES, 2000).

Em uma entrevista publicada em fevereiro de 2013 no boletim ABNT⁸, a pesquisadora Maria Cristina Zamberlan, que atua na área há 29 anos, descreveu os papéis da ergonomia, como aquela que

[...] estuda a interface entre as pessoas e os objetos ou artefatos que a cercam, em um determinado contexto. Como os contextos quase sempre são dinâmicos, variáveis, a relação entre as pessoas e esses artefatos também muda [...]. A ergonomia e as ciências que guardam algumas interfaces com ela trabalham com métodos, como a Análise Ergonômica do Trabalho (AET), que propiciam o conhecimento detalhado das atividades que uma pessoa ou um conjunto de pessoas executam em um determinado contexto.

Com base no diagnóstico obtido nesses estudos é possível reprojeter os artefatos com os quais as pessoas interagem e, desse modo, adequar esses artefatos às capacidades e limitações de uma pessoa ou de um conjunto de pessoas que trabalham de modo cooperativo.⁹ (ZAMBERLAN, 2013)

Iida (1990) ressalta que, para entender os aspectos humanos que permeiam a utilização de um objeto, ferramenta ou a própria interação com um ambiente, é necessário entender tanto o funcionamento quanto o dimensionamento do corpo humano. O autor apresenta as principais funções do organismo no que concerne seu aspecto operacional. Nestas, são incluídas as funções neuromusculares, a coluna vertebral, o metabolismo, a visão, a audição e o senso sinestésico. Ora, estes tratam, além da cognição, de aspectos biomecânicos do corpo humano.

1.2 Análise Ergonômica do Trabalho

A Análise Ergonômica do Trabalho (AET) permite compreender situações reais de trabalho e diagnosticá-las com base nas normas vigentes.

A Análise Ergonômica do Trabalho - AET é uma intervenção no ambiente de trabalho, para estudo dos desdobramentos e conseqüências físicas e psicofisiológicas, decorrentes da atividade humana no meio produtivo. Consiste em compreender a situação de trabalho, confrontar com aptidões e limitações e diagnosticar situações críticas. (FERREIRA, RIGHI, 2009)

^{8,9} ZAMBERLAN, M. C. P. L. Atenção aos limites do ser humano. BOLETIM ABNT. Volume 11, nº 126. Fev 2013. p. 6-9

A base da análise do trabalho é colocada por Zamberlan(2013) como consistente em diversos tipos de análises em função dos focos nos movimentos do trabalhador, na sua coleta de informações, nos procedimentos executados no sistema de produção e no seu processo de raciocínio.

O primeiro foco colocado acima diz respeito à todos os aspectos inerentes às movimentações realizadas durante uma atividade. Deslocamentos com ou sem carga, trabalho manual, posturas assumidas e alcances podem ser colocados como alguns dos aspectos relacionados à este foco. (Os aspectos relacionados à elevação de carga não serão contemplados neste trabalho. Porém, é importante ressaltar a sua importância nos riscos ocupacionais).

Toda a movimentação realizada em um ambiente de trabalho está relacionada à disposição das ferramentas, equipamentos e mobiliário utilizados durante a realização da atividade. Ainda mais, o projeto pelo qual estes elementos foram idealizados influem diretamente na maneira como serão utilizadas.

O trabalhador não resolve problemas, ele os constrói. O estudo do comportamento do operador na situação real de trabalho, de modo a compreender como ele constrói o problema, é do tipo empírico e toma como base a Análise Ergonômica do Trabalho (AET) (ZAMBERLAN, 2013)

O ser humano se adapta à situações, independente do esforço não percebido que esta traz consigo. A tarefa prescrita difere da atividade realizada, uma vez que não é possível acessar todas as memórias existentes sobre a realização de uma atividade já intrínseca na rotina. Para ilustrar esta colocação, Eagleman (2012) propõe o seguinte experimento:

Feche os olhos, segure um volante imaginário e passe pelos movimentos de uma troca de pistas. Imagine que está na pista da esquerda e gostaria de passar para a da direita. [...] Estou deduzindo que você segurou o volante reto, depois o girou um pouco para a direita por um momento, depois o endireitou. [...] O movimento de girar o volante um pouco para a direita, depois endireitá-lo, tiraria você da rua. [...] O movimento correto para trocar de pista é girar o volante para a direita, voltar ao centro e continuar a girar o volante só um pouco para a esquerda, e então endireitá-lo. [...] É uma tarefa motora simples que você não tem dificuldade de realizar quando dirige cotidianamente. Mas, quando obrigado a acessá-la conscientemente, você se confunde¹⁰. (EAGLEMAN, 2012)

Tendo isto em vista, a Análise Ergonômica do Trabalho no sentido da movimentação do indivíduo é realizada para diagnosticar situações insatisfatórias e minimizar o risco de doenças ocupacionais a partir das situações reais de trabalho. Situações estas que o

¹⁰ EAGLEMAN, D. *Incógnito: as vidas secretas do cérebro*. Tradução de Ryta Vinagre. Rio de Janeiro: Rocco, 2012.

trabalhador pode nem ter consciência. O levantamento destas é realizado, dentre outros, por meio de observações, análises posturais e fluxos de deslocamento.

Corlett, Madeley e Manenica (1979) datam o início do registro de métodos utilizados em análise postural do século 17. Uma descrição destes métodos pode ser observada em Li et al (1999). Os autores os categorizam em métodos de observação e métodos diretos. A primeira categoria compreende os métodos baseados em anotações (*pen-paper*) e os baseados em registro por vídeo e auxiliados por sistemas computacionais. Já os métodos diretos são aqueles em que a postura é determinada partir de equipamentos manuais ou eletrônicos.

Clark e Corlett (1984) publicaram um manual com recomendações de design para mobiliário e ambientes de trabalho. Neste, posturas e alcances de populações variadas são traduzidos em medidas para a utilização em projeto. Independente do método utilizado, o levantamento de posturas adotadas e aspectos biomecânicos do trabalhador ou aquele que realiza alguma atividade é crucial no projeto de situações de trabalho satisfatórias.

A determinação dos níveis de aceitação de posturas de trabalho é disposta na Norma Internacional ISO 11226¹¹. De acordo com a referida norma, é recomendado que durante a realização de uma atividade de trabalho, o trabalhador possa variar física e mentalmente entre tarefas de curto e longo ciclo de duração. Da mesma forma, todas as possibilidades de realização de uma atividade devem levar em consideração as dimensões corporais da população que realiza estas atividades, assim como a maneira com a qual estas são realizadas.

1.3 Biomecânica

A ciência que lida com posturas e comportamentos do corpo humano no sentido mecânico é a biomecânica. Tichauer (1978) defendeu que o simples estudo de aspectos biomecânicos na concepção de ambientes de trabalho é suficiente para prevenir doenças ocupacionais e acidentes. Neste sentido, o projetista deve levar em consideração tais aspectos, referentes à população que irá utilizar a área de trabalho, ao confeccionar produtos e ambientes.

¹¹ INTERNATIONAL STANDARD ISO 11226:2000. *Ergonomics: Evaluation of static working postures*. 2000.

A ergonomia, como o campo que lida com interações (tanto físicas quanto comportamentais) entre o homem, seu local de trabalho, suas ferramentas e o ambiente de uma maneira geral, é um campo muito amplo. [...] Doenças ocupacionais, acidentes e baixos níveis de produtividade são, muitas vezes, o resultado da negligência inadvertida de simples princípios biomecânicos no projeto de equipamentos do leiaute do local de trabalho¹². (TICHAUER, 1978. Tradução do autor)

A biomecânica utiliza as leis da física e da engenharia para descrever o movimento realizado pelos vários segmentos e as forças agindo nestas partes do corpo durante uma atividade diária normal.

Winter (1979) coloca os papéis da biomecânica do movimento humano como descrever, analisar e avaliar. Também denominada cinesiologia, a ciência é dedicada à ampla área do movimento humano, envolvendo aspectos da psicologia, aprendizado motor e fisiologia do exercício. O que muda entre os casos é tarefa específica realizada e o nível de detalhes requerido a respeito da performance do movimento em questão.

A cinesiologia descreve as leis e o relacionamento quantitativo essencial para o entendimento dos mecanismos envolvidos na performance humana, tanto de indivíduos, quanto de grupos de indivíduos interagindo entre si. (...) Os aspectos biodinâmicos da cinesiologia são explicados através da cinemática, que lida com a geometria e os padrões dos movimentos, sem considerar as forças que o produzem¹³. (WINTER, 1979. Tradução do autor)

Schoenardie (2012) coloca os métodos de medição em biomecânica como divididos em quatro: cinemetria – responsável pela posição e orientação dos segmentos corporais; dinamometria – responsável pela medição de forças e distribuição da pressão, eletromiografia – responsável pelo levantamento de atividades musculares e antropometria – responsável pelos parâmetros para os modelos corporais.

Para os fins deste trabalho, serão considerados apenas os aspectos antropométricos e cinemáticos.

¹² Texto em língua estrangeira: Ergonomics, the discipline dealing with the interaction - physical as well as behavioral - between man, his workplace, his tools, and the general environment, is a very broad field. [...] occupational disease, accidents, and low levels of productivity are more often than not the result of inadvertent neglect of simple biomechanical principles in the design of equipment of workplace layout.

¹³ Texto em língua estrangeira: "Kinesiology describes the laws and quantitative relationship essential for the understanding of the mechanisms involved in human performance, either of individuals or groups of individuals interacting with one another. [...] the biodynamic aspects of kinesiology are explained through kinematics, which is concerned with the geometry and patterns of movement, but not with causative forces producing motion."

1.3.1 Sistema de referências

A definição de qualquer sistema depende de referências. Em antropometria, por exemplo, medidas lineares são extraídas a partir das definições de marcas anatômicas em relação a uma postura de referência e um sistema de planos determinados a partir de um eixo de coordenadas. Estas referências também são necessárias para descrever o movimento humano. Neste trabalho, estas serão expostas, uma vez que serão utilizadas para definir planos, eixos e estruturas corpóreas.

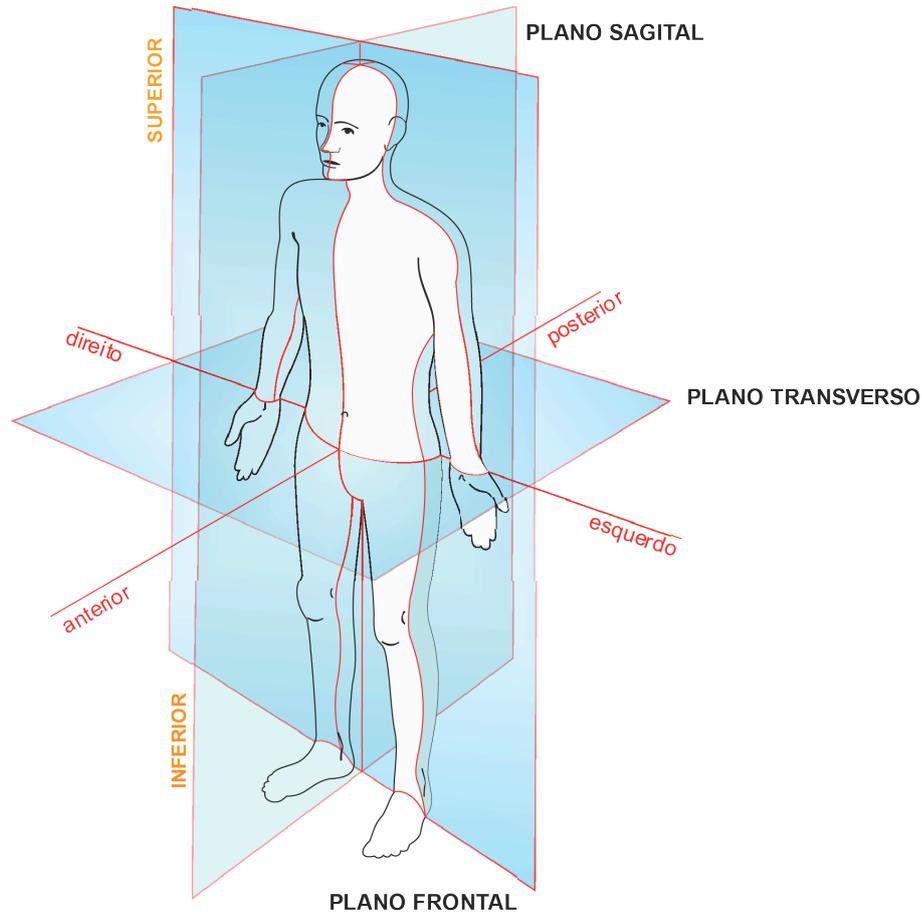
Como padrão, as referências utilizadas em biomecânica são definidas com base na anatomia humana. Os termos anatômicos que descrevem as relações entre as diferentes partes do corpo são baseados na posição anatômica. Esta posição é utilizada como uma posição de referência, da qual são derivados os planos anatômicos e os termos utilizados para descrever uma movimentação ou determinar a posição de um segmento no espaço. A posição em questão é determinada pelo corpo ereto (de pé), com os membros superiores estendidos ao longo do tronco, as palmas das mãos voltadas para a frente, pés e cabeça orientados para a frente (DANGELO; FATTINI, 2007; DRAKE; VOGL; MITCHELL, 2010). A partir desta postura de referência, os planos e eixos são definidos onde:

O plano coronal (ou frontal) é definido como o plano vertical que divide o corpo nas seções anterior e posterior; o plano sagital é o plano vertical que divide o corpo nas seções laterais direita e esquerda e sagital mediano é aquele que passa pelo centro do corpo; e o plano transversal (ou horizontal) divide o corpo nas seções superior e inferior (Figura 1).

A partir do centro do corpo definido a partir dos planos anatômicos, ou seja, a interseção entre os planos, seis termos são utilizados para descrever a direção:

“Anterior” e “posterior” descrevem a localização em relação à “frente” e “atrás”, “medial” e “lateral” descrevem a posição em relação ao plano sagital, onde “mediais” são as estruturas que se aproximam do plano sagital mediano e “laterais” se afastam; “superior” e “inferior” descrevem as estruturas que em relação ao eixo vertical; e os termos “proximal” e “distal” se referem à pontos mais próximos ou distantes da origem de uma estrutura.

Figura 1 - Definição dos planos ortogonais em relação à postura de referência



FONTE: Adaptado de WHITTLE, 2007, f. 9.

A definição de movimentações articulares também é realizada com referência nos planos anatômicos (Figura 2):

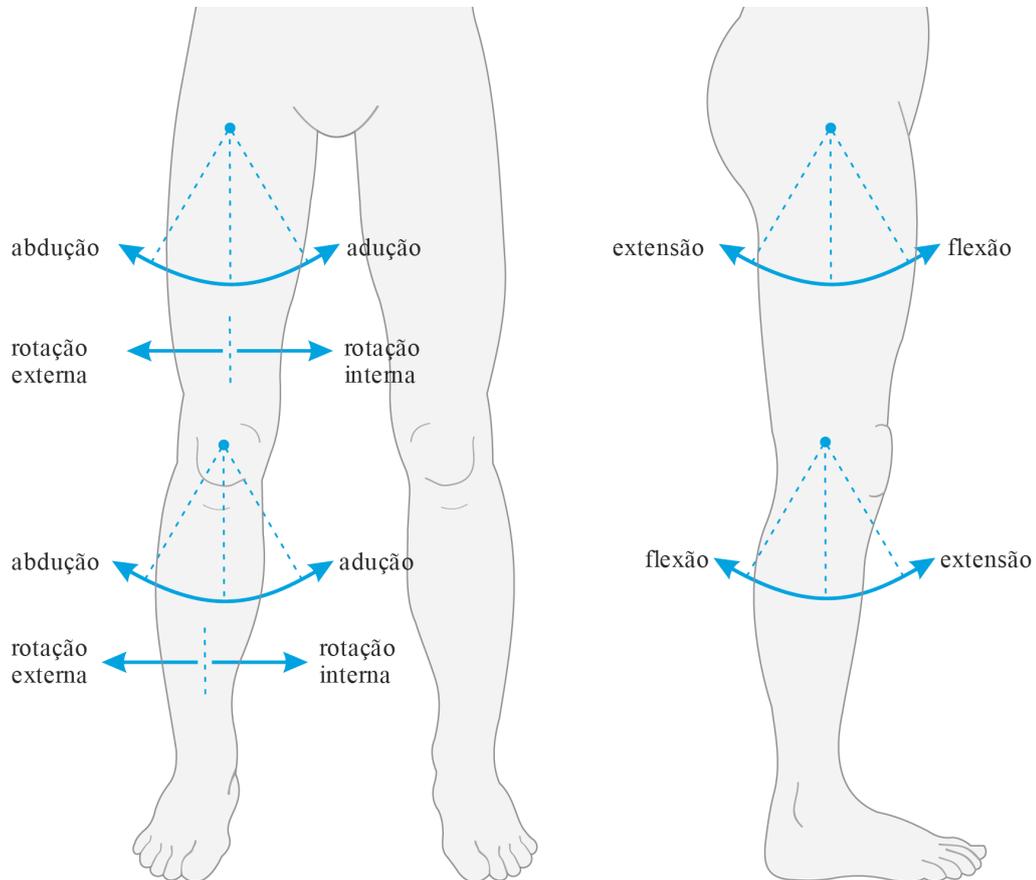
Os movimentos angulares ocorrem quando há variação entre o segmento que se desloca e aquele que permanece fixo (DANGELO, FATTINI, 2007). Quando ocorre a diminuição deste ângulo, o movimento é considerado como flexão e, quando ocorre o aumento, denomina-se extensão. Quando realizados no plano sagital, a flexão corresponde à aproximação e a extensão corresponde ao afastamento do segmento em relação ao plano coronal; Os movimentos de flexão lateral direita e esquerda ocorrem no plano frontal;

Os movimentos de abdução e adução ocorrem quando o segmento é deslocado em direção ao plano mediano ou em direção oposta. Quando realizados no plano coronal ou transversal, fazem correspondência à aproximação (adução) e ao afastamento (abdução) do plano sagital;

Rotação é o movimento onde o segmento gira em torno de um eixo longitudinal. Os movimentos de rotação interna (medial), ou externa (lateral) ocorrem no plano transversal em

relação ao plano sagital, onde a rotação interna ocorre em direção ao plano sagital mediano e a externa em direção oposta.

Figura 2 – Representação dos movimentos articulares dos membros inferiores



FONTE: Adaptado de WHITTLE, 2007, f. 11.

Os movimentos de desvio radial e ulnar ocorrem no plano frontal em relação ao plano sagital, onde o desvio radial ocorre quando a articulação do punho se inclina em relação ao rádio e o desvio ulnar ocorre quando a articulação do punho se inclina em relação à ulna;

Os movimentos de pronação e supinação ocorrem no plano transversal e dizem respeito à rotação medial (pronação) e lateral (supinação) do antebraço.

Estas nomenclaturas são de importante conhecimento, uma vez que as definições de ângulos de conforto ou níveis de aceitação postural em diferentes métodos são mensurados com base nelas.

1.3.2 Antropometria

A antropometria trata das medidas do corpo humano, particularmente as medidas do tamanho e forma (PHEASANT apud AÑES, 2000). Iida (1990) coloca que a importância de estudos antropométricos cresceu, desde os anos 1940, à medida em que começou a haver a necessidade de medidas antropométricas mais detalhadas e confiáveis, tanto para adequar projetos à produções em massa, quanto para adequar postos de trabalho às populações específicas, etc. Este crescimento foi inicialmente provocado pelas necessidades da produção em massa, onde a variação de alguns centímetros em um projeto de um carro, por exemplo, poderia provocar um aumento considerável nos custos de produção.

A dimensão mais básica do corpo humano é o comprimento dos segmentos intra-articulares. Estes podem variar de acordo com a constituição física do corpo, idade, sexo e origem racial (WINTER, 1979).

Os métodos utilizados na antropometria tradicional são baseados em uma série de medidas que correspondem às distâncias lineares entre pontos anatômicos e valores de circunferências em locais previamente definidos. Porém, estas medidas fornecem informações limitadas a respeito da forma humana. Avanços na tecnologia de digitalização de superfícies levaram ao surgimento da antropometria superficial 3D, onde scanners de corpo inteiro são utilizados para gerar modelos humanos detalhados em alguns segundos (AZOUZ; SHU, C; MANTEL, 2006).

Novas ferramentas advindas de avanços tecnológicos permitem conhecer e analisar o volume humano de forma antes não possível através da antropometria tradicional.

A utilização do console MS Kinect neste contexto também tem sido estudada devido à possibilidade de capturar nuvem de pontos a partir dos sensores de profundidade. Esta abordagem elimina a necessidade de contato físico do pesquisador¹⁴ com o sujeito e torna o processo mais ágil. Robinson e Parkinson (2013) publicaram uma metodologia para extração de medidas antropométricas a partir do Kinect. Em seu estudo, pode ser observado que a precisão do console em termos de obtenção de estatura e dimensões de outros segmentos corpóreos foi aceitável. Da mesma forma, foi concluído que a utilização de mais de um

¹⁴ Embora a eliminação de contato físico do pesquisador com o sujeito seja desejável, pesquisas antropométricas populacionais significativas não devem ser baseadas em medidas extraídas automaticamente. Para obter medidas confiáveis passíveis de serem utilizadas em antropometria, a utilização de marcas anatômicas ainda é um método necessário, uma vez que sistemas que realizam extração automática de medidas são baseados em suposições da localização de marcas anatômicas. O estado da técnica ainda não permite que o viés do especialista seja eliminado do processo. (ROBINETTE; A.M.; ZEHNER, G. F.; 2004)

console pode aumentar a confiabilidade do sistema. Embora o estudo ainda necessite de dados quantitativos mais expressivos para uma validação estatística, são resultados que demonstram o potencial da ferramenta.

Analisar a variabilidade volumétrica humana é importante para a engenharia de sistemas humanos e para aplicações de animação, cuja sintetização de humanos virtuais realísticos é necessária para recriar atividades sociais humanas em contextos históricos e culturais. Caracterizar e entender a variação da forma humana é essencial para um melhor design ergonômico de qualquer produto com o qual as pessoas interagem, como roupas, automóveis e estações de trabalho. Recentemente, pesquisadores na comunidade de animação computadorizada tem percebido a importância na geração de atores realísticos, o que é feito a partir da captura de movimentos (AZOUZ et al, 2004; XIN, 2007).

Para Iida (1990), “o dimensionamento do posto de trabalho está intimamente relacionado com a postura e nenhum deles pode ser considerado separadamente do outro”¹⁵.

Portanto, não é possível dissociar a antropometria da cinemática, uma vez que as características do movimento de cada pessoa dependem diretamente de como seus segmentos, articulações e volume são configurados. Esta afirmação é justificada por Chamberlain (2009), que argumenta que “não existem pessoas com todas as suas dimensões estabelecidas em médias, todos somos diferentes de algum modo. À medida em que cada uma de nossas dimensões dita a forma na qual nos movemos, temos diferentes formas de andar.”¹⁶ O autor também coloca que muitas dimensões podem ser coletadas a partir da análise da marcha.

Inclusive, a própria forma volumétrica é um dos fatores que alteram a maneira como alguém se locomove.

1.3.3 Cinemática

Elementos cinemáticos são colocados por Tichauer (1978) como ponto de partida da manobra cinesiologica. Os elementos consistem em ossos, fibras e estruturas de ligamentos pertencentes a uma articulação enquanto ativos no contexto da geometria do movimento. Para exemplificar a atividade relativa aos elementos cinemáticos, é colocado pelo autor o exemplo

¹⁵ IIDA, I. *Ergonomia: Projeto e produção*. São Paulo, Edgard Blücher, 1990.

¹⁶ Tradução do autor. Texto em língua estrangeira: “[...]there are no people with average measurements for all of their dimensions; we are all different in some way. As each of our dimensions dictate what our gait will be, we will all have slightly different gait.”

de uma flexão de antebraço, da qual fazem parte o úmero, a ulna, a articulação úmero-ulnar e os ligamentos associados. Músculos e forças agindo sobre os elementos em questão são desconsiderados.

O esqueleto humano é formado ossos conectados uns aos outros por meio de articulações. As articulações estão localizadas nas extremidades dos ossos e são necessárias para permitir a movimentação entre os segmentos corporais. Seu papel no sistema músculoesquelético é tão importante que são frequentemente referidos como as “unidades funcionais” do sistema (KROMER et al apud MACIEL 1990; ROSSE; CLAWSON, 1980).

Dentre as articulações moveis, sua capacidade de movimentação é quantificada em *graus de liberdade*¹⁷. “O número de graus de liberdade de um sistema é igual ao número de parâmetros independentes necessários para definir sua posição no espaço em um momento dado de tempo”¹⁸ (MARGHITU, 2005). Cada grau de liberdade é relacionado a um dos movimentos de translação e rotação, totalizando um máximo de 6 graus para cada articulação. Logo, quanto maior o grau de liberdade, maior a variedade de movimentos que pode ser produzido.

As articulações mais comumente encontradas no estudo do movimento humano são classificadas como sinoviais. Uma das formas de classificação destas articulações é relacionada justamente à sua funcionalidade de movimento (graus de liberdade) (DANGELO; FATTINI, 2007; MACIEL, 2001):

- Uniaxiais: divididas em duas categorias, possuem apenas um grau de liberdade. As Trocleartroses – ou dobradiça – se referem às articulações que permitem a rotação em torno de um eixo perpendicular ao comprimento dos ossos envolvidos, como é o caso da articulação do cotovelo (úmero-ulnar). As articulações Trocóides – ou pivô – apresentam movimentos angulares em torno do eixo dado pelo comprimento de um osso, como é o caso da articulação presente no antebraço (rádio-ulnar);
- Biaxiais: divididas em três categorias, possuem dois graus de liberdade. Se referem às Condilartroses, exemplificada pela articulação presente no joelho (fêmur-tibial), nas quais duas superfícies paralelas e arredondadas se articulam com superfícies planas. Elipsóides, onde dois ossos com extremidades ovaladas se articulam, como o punho

¹⁷ Graus de liberdade é a tradução de Degrees of Freedom, ou simplesmente DoF.

¹⁸ Tradução do autor. Texto em língua estrangeira: “The number of degrees of freedom (DOF) of a system is equal to the number of independent parameters (measurements) that are needed to uniquely define its position in space at any instant of time.” (MARGHITU D. Kinematic Chains and Machine Components Design. Elsevier Academic Press. 2005. p.51)

(rádio-cárpica) e Sela, que se diferencia das elipsoidais em função das articulações possuírem dupla curvatura. Quando unidas, a curvatura convexa de uma se encaixa na côncava da outra, como por exemplo, a articulação do polegar (carpo-metacarpiano);

- Poliaxiais: com três graus de liberdade, consistem em uma extremidade esférica em um dos ossos e um encaixe côncavo no outro, permitindo amplitude no movimento (flexão/extensão, abdução/adução, rotação e circundação). O alcance do movimento é determinado pela profundidade do encaixe côncavo. Quanto mais profundo, como é o caso do quadril, maior a estabilidade da articulação e menor o alcance do movimento; enquanto a articulação do ombro é menos profunda, permitindo uma maior variedade de movimentos.

Os ossos do corpo humano tem, dentre suas funções, dar suporte ao corpo, proteger os órgãos vitais, estruturar alavancas para produzir movimento, etc. Classificados por sua forma, os ossos podem ser tubulares (como o úmero e o fêmur), cubóides (como os ossos do carpo e do tarso), planos (como os ossos do crânio), irregulares (como os ossos da face) ou sesamoides (que se desenvolvem nos tendões). Se tratam de tecidos vivos que, ao longo da vida de um ser humano, se modificam por diversos motivos (DRAKE, 2010).

Embora não os sejam, na maioria dos estudos cinemáticos, os ossos são vistos como abstrações matemáticas em forma de estruturas (ou corpos) rígidas¹⁹ (ZATSIORSKY, 1998). Esta abordagem reduz a complexidade dos cálculos dos movimentos de cada segmento, reduzindo o movimento a dois componentes mutuamente independentes de movimento: translação do centro de massa e rotação do segmento em relação do centro de massa. Sendo assim, permite que os parâmetros cinemáticos sejam calculados, uma vez que corpos rígidos contem dimensões fixas (KWON, 2008).

Dentre os parâmetros cinemáticos, estão: posição, deslocamentos angulares e lineares, velocidades e aceleração, onde os dados de deslocamento podem ser levantados a partir de qualquer marca anatômica aliada a um intervalo de tempo – centro de gravidade de segmentos corporais, centros de rotação, extremos segmentares, etc. (WINTER, 1979).

A posição de um corpo é o parâmetro determinante dos seguintes. Ela é definida por Zatsiorsky (1998) a partir da sua localização, orientação e configuração articular.

¹⁹ Um corpo é considerado rígido ou sólido se a distancia entre quaisquer dois pontos intrínsecos a este corpo não se alterarem. (Zatsiorsky, V. M. *Kinematics of Human Motion*. Vladimir M. Zatsiorsky. 1998)

A localização de um corpo no espaço depende da definição de um sistema de coordenadas global. Este, é definido a partir da Regra da Mão Direita²⁰, onde o sistema é fixado no chão, de forma que o eixo X positivo é orientado horizontalmente para frente, definido com base no sentido da movimentação; o eixo Y positivo é vertical e para cima e o eixo Z é horizontal à esquerda, referindo-se à lateralidade do corpo. Embora existam outros, este método de definição do sistema de coordenadas global é convencionalmente utilizado na maioria dos estudos cinemáticos, tendo como fundamento as recomendações de padronização publicados pela Sociedade Internacional de Biomecânica²¹.

Este padrão foi desenvolvido com o objetivo de unificar os resultados obtidos no estudo cinemático, possibilitando sua comparação com diferentes trabalhos e entendimento de uma maneira geral.

A orientação de um corpo diz respeito ao sistema de coordenadas local. Este sistema de referências é definido com base no sistema de orientação global e o corpo em posição anatômica.

A regra da mão direita também se aplica na descrição da orientação dos segmentos. O sistema de orientação é posicionado no centro de massa dos segmentos de forma que o X positivo se refere ao eixo anterior, Y positivo se refere ao eixo proximal e Z se refere ao eixo lateral.

1.3.4 Modelos Biomecânicos

No aspecto amplo, modelos são representações simplificadas de sistemas complexos. No caso de modelos biomecânicos, estes podem ser divididos em diversas classificações, dentre elas estáticos ou dinâmicos, diferentes segmentações do corpo, modelos de força, modelos circulatórios, musculares, etc.

Silva (1999) expõe a complexidade de representar todos os aspectos que influenciam o movimento do corpo humano. “A estrutura do corpo é composta por 206 ossos, que correspondem à corpos rígidos e flexíveis, centenas de músculos, tecidos com diferentes graus

²⁰ A Regra da Mão Direita, ou Regra de Fleming, determinam as direções relativas de orientação de produtos cruzados de vetores. As três direções são representadas pelo polegar, pelo indicador e pelo dedo médio, mantidos em ângulos retos uns em relação aos outros. (REGRAS DE FLEMING. In Infopédia. Porto: Porto Editora, 2003-2013. Disponível em <[http://www.infopedia.pt/\\$regras-de-fleming](http://www.infopedia.pt/$regras-de-fleming)>)

²¹ International Society of Biomechanics (ISB). WU, G.; CAVANAGH, P.R. *ISB Recommendations for Standardization in the Reporting of Kinematic Data*. Journal of Biomechanics. Vol. 28. No. 10. PP. 1257-1261. Copyright Elsevier Science Ltd. 1995.

de elasticidade, articulações com inúmeros graus de liberdade, líquidos e muitas outras características.”²²

Acrescentando ao argumento de Silva, as articulações moveis do corpo humano também podem ter diferentes formas e tipos de encaixe e, nem sempre representam movimentações geométricas simples (Figura 3). A função da articulação pode variar de acordo com a sua localização ou a da própria fisiologia. Porém, em termos de cinemática, a função da articulação é remetida de acordo com seus graus de liberdade (SILVA, 1999; YANG, 2008).

Figura 3 – Representação da articulação do ombro e seu modelo simplificado em diferentes momentos.



FONTE: Visible Body, Skeleton Premium 2, 2012.

Modelos cinemáticos do corpo humano são aqueles que representam sua mobilidade, negligenciando todos os aspectos se não parâmetros de posição e orientação dos segmentos e articulações (WELTER; HOUNSELL, 2004; ZATSIORSKY, 1998). Zatsiorsky (1998) os classifica em esqueléticos (ou antropomórficos) e funcionais:

Os modelos biomecânicos esqueléticos são representados por uma seqüência de corpos rígidos conectados por articulações. A complexidade de cada articulação é considerada no processo de modelagem, visando a simulação fiel do movimento. Estes modelos podem ser rebuscados em termos de visualização, se assemelhando à configuração do esqueleto humano, como também pode ser representados por meio de segmentos de linhas e nós.

Já os modelos funcionais são representados apenas por arcos e segmentos de linhas, onde os corpos rígidos são representados pelas linhas e as articulações por arcos conectando

²² SILVA, F.W.; VELHO, L. *Um sistema de animação baseado em movimento capturado*. In Proceedings of XXV Latin American Conference on Computer Science - CLEI'99 – UNESCO. 1999

as linhas. Esta representação é utilizada em estruturas de dados binários, uma vez que os arcos que representam as articulações conectam dois segmentos.

O método mais comum de representação de modelos cinemáticos em sistemas computadorizados se dá a partir de hierarquia. Esta representação permite que corpos rígidos funcionem de forma dependente de outros corpos rígidos. Dessa maneira, elementos cinemáticos são definidos em função daqueles que estão no topo da hierarquia (WEBER; PHILIPS; BADLER, 1993; MACIEL, 2001). Para exemplificar, em um modelo que tenha a origem determinada no quadril, membros superiores e inferiores, tronco, pescoço e cabeça serão originados a partir deste osso. O quadril, no caso, será o osso determinante da coxa direita que, por sua vez, será determinante da perna direita que, por sua vez será determinante do calcanhar e assim por diante. O mesmo ocorre com as outras cadeias cinemáticas²³. Em outras palavras, osso com a mais alta hierarquia irá determinar o deslocamento do sistema completo.

Nesta representação, são determinadas às articulações seus graus de liberdade, que agirão como balizadores das movimentações possíveis de um corpo rígido nos planos anatômicos. Exemplificando com o caso da articulação do joelho, apenas o deslocamento no eixo longitudinal será determinado por esta articulação, uma vez que possui apenas este grau de liberdade. Enquanto sua inclinação será determinada pelo deslocamento latitudinal do osso que possui este grau de liberdade em posicionamento hierárquico acima, no caso, o quadril.

²³ Uma cadeia cinemática pode ser definida como uma configuração de séries de ligações segmentares do corpo humano.

2 SISTEMAS DE CAPTURA DE MOVIMENTOS

2.1 Definição e Histórico

A captura de movimentos é o processo de coletar dados cinemáticos do objeto de estudo a partir da sua movimentação. Dentre a gama de ferramentas e técnicas disponíveis, é possível encontrar sistemas que registram dados em duas e três dimensões a partir de métodos descritivos, equipamentos mecânicos, eletrônicos, imagens ou dados coletados a partir de sensores. Silva (1998) define que a captura de movimentos consiste em “registrar, através de um processo de amostragem, a posição e orientação das articulações de um ator ao longo do tempo.”²⁴

A história dos sistemas de captura de movimentos como são conhecidos hoje, se merge também com a história da biomecânica, da fotografia e do cinema. Para levantar o histórico a respeito do exponencial desenvolvimento tecnológico dos sistemas de captura de movimentos durante as últimas décadas, é necessário entender sua proveniência. Diversas áreas do conhecimento contribuíram no desenvolvimento dos primeiros métodos e técnicas de descrição e análise do movimento humano.

Toda a literatura encontrada a respeito da história dos sistemas de captura de movimentos denota Aristóteles (384-322 A.C.) como o precursor da biomecânica. Interessado em anatomia e estrutura de seres vivos, em seu livro “De Motu Animalium”²⁵, ele descreve animais a partir de sistemas mecânicos. Leonardo Da Vinci (1452-1519) também contribuiu ao descrever os movimentos humanos a partir de uma perspectiva puramente mecânica. Outra referência de importante cunho foi Giovanni Alfonso Borelli (1608-1679) que, ao seguir os passos de Galileo Galilei (1564-1642), escreveu o trabalho de sua vida, também intitulado “De Motu Animalium”, no qual analisa a ação muscular, e movimentos segmentares de homens e animais (SCHEPERS, 2009; MEDVED, 2001; ROETENBERG, 2006).

Os irmãos Weber²⁶ foram um dos primeiros a reportar quantitativamente parâmetros espaciais e temporais sobre a marcha humana, em 1836 (WHITTLE, 2007). O grande marco na história dos sistemas de captura de movimentos data da mesma época, no final do século

²⁴ Silva FW, Velho L. Um sistema de animação baseado em movimento capturado. 1998

²⁵ De Motu Animalium, O movimento dos animais. SCHEPERS, 2009.

²⁶ Wilhem Weber (1804-1891) e Eduard Weber (1806-1871)

19, quando o fotógrafo inglês Eadweard Muybridge (1830 – 1930) dá início à estudos fotográficos descritivos sobre o movimento humano e animal. Muybridge desenvolveu o que pode ser considerado o primeiro projetor de filmes, chamado zoopraxinoscópio. Utilizando múltiplas câmeras, registrou ensaios sobre a cinemática, os quais “Locomoção Animal”²⁷ é considerado por Clegg (2007)²⁸ como sua grande obra-prima (Figura 4). Medved (2001)²⁹ também aclama que o trabalho de Muybridge contribuiu para uma nova linguagem científica no campo da cinemática.

Figura 4 – Do trabalho “Animal Locomotion”, Plate 65, de Eadweard Muybridge, 1887.



FONTE: Copyright 1888 by Eadweard Muybridge. Disponível em <http://www.muybridge.org/> (Acesso em 27 fev. 13)

Esta técnica baseada em fotogrametria foi utilizada de forma científica pela primeira vez pelo fisiologista francês Etienne-Jules Marey (1830 – 1904). Inspirado por Muybridge, Marey buscou alternativas para a limitação encontrada na época - justamente a respeito do registro de movimentos rápidos, uma vez que as placas de vidro não poderiam ser trocadas de

²⁷ “*Animal Locomotion, an electro-photographic investigation of consecutive phases of animal movements. 1872 – 1885.*” University of Pennsylvania. Philadelphia. 1887

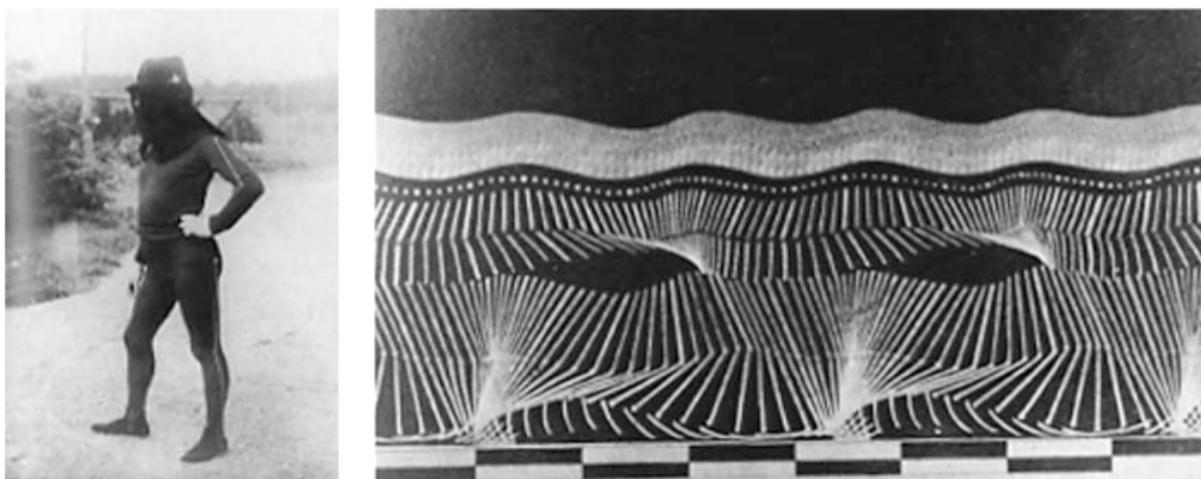
²⁸ CLEGG, B.. The man Who stopped time: the illuminating story of Eadweard Muybridge: father of motion Picture, Pioneer of photography, murderer. Joseph Henry Press; 2007.

²⁹ MEDVED, V. Measurement of human locomotion. CRC Press. 2001.

maneira ágil. As soluções encontradas por Marey foram múltipla exposição, onde a mesma placa de vidro registrava todos os movimentos, e o desenvolvimento de uma arma capaz de registrar 12 fotos por segundo (THE BILL DOUGLAS, 2002).

Arruda (2010) descreve outra contribuição desenvolvida por Marey, em 1884, que consistia em uma vestimenta preta colada ao corpo com marcadores brancos, a qual, quando registrada, permitia a análise do movimento a partir dos segmentos a partir do contraste gerado (Figura 5).

Figura 5 – Etienne-Jules Marey. Vestimenta preta com marcadores brancos e resultado gerado pela exposição em contraste



FONTE: Moving Pictures. Disponível em <http://www.theslideprojector.com/> (Acesso em 27 fev. 2013)

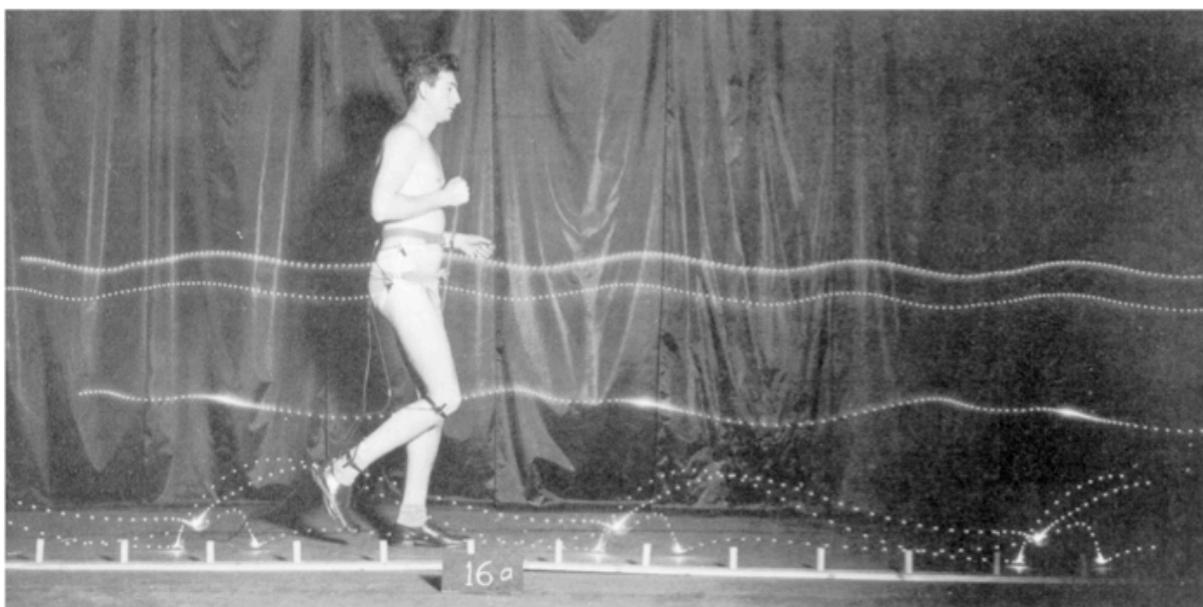
De forma similar a Marey, Willhem Braune (1831-1892) e Otto Fischer (1861-1917) aplicaram esta técnica utilizando iluminação fluorescente na forma de marcadores (o que é atualmente conhecido como a técnica de captura ótica utilizando marcadores ativos). No referido trabalho³⁰, publicado em 1899, as imagens geradas permitiam que fossem determinadas matematicamente as trajetórias em 3D dos segmentos estudados, assim como outros parâmetros cinemáticos (WHITTLE, 2007; VEIGA; ROSA; SIRGADO, 2010).

³⁰ Fischer O, Braune CW. *Der Gang des Menschen*. B. G. Teubner. 1899.

Após a publicação deste trabalho, ângulos articulares e deslocamentos segmentares se tornaram uma medida essencial na análise cinemática. O trabalho foi considerado “uma sólida fundação científica para o nosso conhecimento atual sobre a marcha humana”³¹.

No século 20, Verne Inman (1905-1980), Howard Eberhart (1906 – 1993) e seu grupo da Universidade da Califórnia também contribuíram para o entendimento mecânico do movimento humano através de técnicas de captura ótica utilizando luz interrompida. Este processo era realizado utilizando uma câmera fotográfica com a lente aberta e os marcadores ativos em pontos anatômicos do usuário. A rotação de um disco entalhado em frente à câmera produzia uma série de pontos referentes às trajetórias das articulações em intervalos de tempo iguais (Figura 6) (SUTHERLAND, 2001).

Figura 6 – Experimento de Inman e Eberhart utilizando luz interrompida para estudo cinemático.



FONTE: SCHEPERS, 2009, f. 11

Ambas as realizações de Inman, Eberhart e Braune, Fischer, embora fossem dotadas de valor científico, eram demasiadamente trabalhosas em relação à sua análise, não sendo tão eficientes para outros propósitos além da análise da marcha. Porém, foram os primeiros passos para atingir o estado da técnica de hoje.

³¹ SCHEPERS, M. *Ambulatory assessment of human body kinematics and kinetics*. H.M. Schepers, Hengelo, The Netherlands. 2009.

Medved (2001) também data o início da aplicação de estudos sobre o movimento humano em ergonomia de 1911, onde o casal Gilbreth³² se dedicou à estudos de movimento e fadiga relacionados ao trabalho. Eles desenvolveram técnicas que visavam a melhoria do trabalho, tanto no sentido de produtividade, quanto na qualidade de vida dos trabalhadores a partir do estudo do movimento (SILVA; PASCHOARELLI, 2010).

Estes marcos tratam do desenvolvimento de ferramentas de pesquisa e análise, que não podem deixar de considerar os esforços da área de entretenimento. O desenvolvimento das tecnologias utilizadas em fotografia e cinema, e o crescente investimento que começou a surgir nessa área, permitiu que o estado da técnica fosse atingido e superado sucessivamente, oferecendo ferramentas cada vez mais precisas para as áreas de pesquisa do movimento humano.

Uma das técnicas de animação mais antigas foi criada em 1915 por Max Fleischer (1883 – 1972). A rotoscopia consiste em “animar diretamente sobre um movimento filmado, quadro a quadro”³³ (RINCÓN; ZAMBRANO, S/A).

Um importante registro de análise da marcha humana utilizando captura de movimentos é datado dos anos 1960 por Sutherland (2001). Este sistema, desenvolvido por Mary Pat Murray (1925-1084) consiste na utilização de marcadores reflexivos em pontos anatômicos de um voluntário que, durante sua movimentação, era iluminado por luz estroboscópica. A partir deste registro, era possível medir segmentos individuais e gerar dados cinemáticos.

A cinemática, quando analisada com base em sequencias de imagens, é acrescentada de valor temporal, que determina que outros parâmetros sejam calculados. Esta análise para fins biomecânicos pode ser também aliada à outras técnicas de medição, como por exemplo a de força (cinética). Dados obtidos por eletromiografia³⁴ possibilitam a correlação do movimento articular com os músculos que geram o movimento.

Medved (2001) coloca que até os anos 1970, a fotografia estroboscópica com múltiplas exposições e a cinematografia eram as técnicas dominantes na medição cinemática. Estas técnicas, embora trouxessem grandes vantagens no sentido de diversificar a população passível de ser analisada e também aumentar a quantidade de dados a ser analisados, demandava esforços computacionais não existentes até então.

³² Frank (1868-1924) e Lillian Moller Gilbreth (1878-1972).

³³ Texto em língua estrangeira: “Esta técnica consistia em animar directamente sobre un movimiento filmado cuadro por cuadro.”

³⁴ Eletromiografia é o método de registro dos potenciais elétricos gerados nas fibras musculares em ação. (ENOKA, R. M. Bases neuromecânicas da cinesiologia. 2ª ed. São Paulo. Manole. 2000.)

Entretanto, a partir dos anos 1970, com o advento da computação digital, estas análises começaram a se tornar mais automatizadas. A introdução de técnicas digitais de vídeo tiveram um grande impacto na habilidade de medir a movimentação humana (CHAMBERLAIN, 2009).

Os sistemas de captura de movimentos que registram a orientação dos pontos em 3D também começaram a surgir em 1970. Sua ascensão é advinda dos avanços nos campos de eletrônica, engenharias, controle da automação, telemetria, computação gráfica, entre outros. Esses avanços contribuíram para novas soluções para sistemas de medição, avaliação quantitativa e diagnóstico do movimento (MEDVED, 2001).

Exemplificando um dos avanços colocados acima, acelerômetros são colocados por Chaffin et al (1975) como uma das técnicas disponíveis para a medição do movimento corporal em 3D. Estes são utilizados para medir a aceleração linear de um objeto. O posicionamento de seis acelerômetros em orientação ortogonal permitem a medição direta de ambos parâmetros de aceleração linear e angular de um segmento. O autor também expõe que a utilização de três acelerômetros, embora forneçam dados biomecânicos úteis, podem resultar em acúmulos de erro se não calibrados e integrados propriamente.

Outra técnica importante se trata da eletrogoniometria, que possibilita o registro de ângulos articulares durante um intervalo de tempo. A eletrogoniometria é baseada na utilização de goniômetros³⁵ acoplados à um transdutor ou potenciômetro, o que resulta na aquisição direta dos dados articulares dinâmicos. Dois dos pioneiros desta técnica, citados por Sutherland (2001), são os irmãos Kapovich (1980). No seu trabalho, goniômetros triaxiais coletavam dados angulares das articulações de forma automática, permitindo a criação de gráficos sem a necessidade de reduzir dados manualmente.

Em 1985, o primeiro comercial utilizando rotoscopia digital foi lançado. “Brilliance”³⁶ foi filmado com câmeras tradicionais, onde uma atriz utilizava referências anatômicas que eram, então, reconstruídas em um modelo 3D computadorizado.

Embora sem o cunho científico da análise do movimento, este primeiro exemplo de rotoscopia digital abriu precedentes para a digitalização do movimento. A técnica, embora com suas restrições, foi incorporada à tecnologia digital dos dias de hoje. A evolução da

³⁵ Goniômetro é um transferidor com dois braços de referência. Os braços são alinhados com o eixo longitudinal dos segmentos corpóreos adjacentes à articulação, com o centro (fulcro) do transferidor posicionado sobre o centro articular estimado. (CHAFFIN DB et al. Biomecânica Ocupacional. Tradução da terceira edição Norte Americana de Occupational Biomechanics. Ergo Editora. Wiley & Sons. 1999 p. 94)

³⁶ Brilliance. Robert Abel & Associates. 1985.

rotoscopia é colocada por Bairrão (2006), à qual deu origem à transposição direta do movimento a partir de uma captura.

Em paralelo às tecnologias baseadas em imagens e sensores, também começaram a surgir sistemas sônicos e eletromagnéticos, cuja principal vantagem era o rastreamento dos pontos anatômicos em tempo real e sem oclusões causadas por sobreposições de segmentos ou elementos na área de captura. (CHAFFIN; ANDERSSON; MARTIN, 1999).

O que pode ser observado em relação à evolução dos sistemas, é a união destas técnicas em sistemas mais complexos e completos.

Algumas das limitações das técnicas aqui expostas estão no fato dos sistemas baseados em sensores externos ao corpo poderem sofrer deslocamento em relação ao seu posicionamento inicial. O próprio fato de seu posicionamento ser externo ao corpo denota na projeção lateral da articulação, ou seja, uma estimativa.

Da mesma forma, a realização de movimentos complexos em torno de mais de um eixo requerem que sistemas mais completos sejam utilizados. Estes fatores podem comprometer a confiabilidade dos dados. Esta questão relacionada à projeção estimada da articulação ainda hoje está em debate, não apenas em sistemas baseados em goniômetros.

Grimpampi et al. (2013) colocam que a utilização de qualquer tipo de marcador ou sensor externo ao corpo, mesmo possuindo algoritmos sofisticados, não passam de estimativas e que futuros trabalhos devem levar em consideração a necessidade de modelar ou estimar também o artefato do tecido mole. Esta colocação, no entanto, apenas ilustra que o erro sempre existe. A aplicação final que determinará se o erro é aceitável ou não - por exemplo, em aplicações clínicas, onde a precisão é fundamental para uma tomada de decisão correta.

2.2 Tecnologias

Os critérios de classificação de sistemas de captura de movimentos são colocados por Perales(2001) de três formas: a partir da sua localização da fonte emissora e dos marcadores, a partir da forma de obtenção dos dados capturados e a partir da tecnologia utilizada.

No primeiro caso, são expostos pelo autor três categorias: *Inside in*, *inside out* e *outside in*, onde a primeira palavra é referente à localização do sensor e a segunda do receptor. Ou seja, nos sistemas *inside in*, ambos estão localizados no corpo do usuário. Este

fator permite maior liberdade em relação a espaço de captura, porém são considerados obtrusivos, devido ao seu volume de componentes. Esses sistemas permitem a captura de partes menores do corpo, como mãos e dedos. Alguns sistemas mecânicos estão inseridos nesta categoria.

Nos sistemas *inside-out*, os sensores estão no corpo do usuário e o receptor está fora. Isso normalmente requer uma área delimitada de ação. Os dados obtidos fornecem boa descrição 3D dos sensores, embora seja restringido a partes maiores do corpo. Sistemas magnéticos e acústicos estão inseridos nesta categoria.

Já nos sistemas *outside-in*, o receptor está localizado no corpo do usuário, enquanto sensores externos capturam seus sinais. É o caso dos sistemas óticos ativos, que refletem a luz emitida por flashes. Também são limitados em relação à área de captura e sofrem de oclusão, porém não são obtrusivos.

A segunda maneira de classificar os sistemas de captura é relacionada à forma de obtenção dos dados, que pode ser direta ou indireta.

Na forma direta, estão inseridos os sistemas acústicos, mecânicos e magnéticos, onde não é necessário um processamento posterior dos dados. Normalmente, esses sistemas já possuem filtros para diminuir ruídos.

Na forma indireta, onde estão inseridos os sistemas óticos, além de uma alta taxa de amostragem, é necessário processamento posterior dos dados.

Vale salientar que cada sistema possui suas vantagens e desvantagens e sua escolha normalmente depende da utilização que se pretende dar. Fatores sobre como os dados serão analisados, ou o nível de precisão e definição requerido na captura, a taxa de amostragem, e a área em que a captura será realizada são de importante análise anterior à escolha do sistema.

Por exemplo, ao capturar esportes, é necessário uma alta taxa de amostragem, portanto um sistema ótico é mais indicado. Já no caso de trabalho manual de precisão, o indicado é um sistema mecânico, uma vez que sistemas óticos podem sofrer de áreas de oclusão (PERALES, 2001; ROETENBERG, 2006).

A última classificação, que será utilizada como base para descrever os sistemas de captura de movimentos neste trabalho, é em relação à sua tecnologia. Nesta categoria, estão os sistemas mecânicos, acústicos, magnéticos, inerciais e óticos.

a) Sistemas Mecânicos e Sistemas Acústicos

Os sistemas mecânicos são compostos por goniômetros e capturam o comportamento angular das articulações. Estes dados, quando utilizados em conjunto com algoritmos cinemáticos, permitem que posturas também sejam determinadas (ROETENBERG, 2006).

Se trata de um sistema obtrusivo, posicionado externamente ao corpo do usuário, podendo levar à limitação ou intimidação da sua movimentação. Outra limitação do seu uso é referente à própria configuração do corpo. Quando em uma movimentação, os tecidos moles corporais podem deslocar o equipamento do seu posicionamento inicial. Da mesma forma, seu alinhamento deve levar em consideração o posicionamento preciso da articulação e como esta será projetada. Outra limitação nestes sistemas reside nas articulações com múltiplos graus de liberdade, como o ombro, o que dificulta o posicionamento do equipamento (ROETENBERG, 2006).

Já os sistemas acústicos utilizam pulsos ultrassônicos para determinar a posição dos sensores. Podem tanto ser *outside-in*, quanto *inside-out*. No primeiro caso, os receptores acústicos estão no corpo do usuário, enquanto os emissores sonoros enviam sinais de fora. A medição do posicionamento neste caso, é feita a partir de triangulação.

No segundo caso, emissores sonoros são posicionados no corpo do usuário, enquanto receptores acústicos externos recebem seus sinais, medindo o tempo que leva o percurso sonoro (SCHEPERS, 2009; GOMIDE et al. s/d).

b) Sistemas Magnéticos

Como o próprio nome sugere, sistemas magnéticos utilizam uma fonte transmissora para gerar um campo magnético. Como é um sistema *inside out*, os sensores são posicionados no corpo do usuário. Estes sensores medem a baixa frequência gerada pela fonte. A fonte transmissora é constituída de três bobinas perpendiculares que emitem o campo magnético quando uma corrente é aplicada. Os sensores, então, medem a força deste sinal, que é proporcional à distancia da fonte. O sistema é conectado a um processador que calcula posição e orientação de cada sensor (MOTION CAPTURE TECHNOLOGY, 2010; ROETENBERG, 2006).

Os sistemas magnéticos, embora não sofram de problemas gerados por áreas de oclusão, possuem baixa tolerância à materiais metálicos, principalmente metais ferrosos, os quais perturbam o campo magnético gerado pela fonte. Da mesma forma, são limitados em relação à área de captura, uma vez que a força do campo magnético diminui à medida em que a distancia entre os sensores e a fonte transmissora aumentam.

e) Sistemas Inerciais

Sistemas inerciais podem ser considerados como a evolução dos sistemas magnéticos. Enquanto sistemas magnéticos se baseiam em magnetômetros, os sistemas inerciais, além destes, possuem também acelerômetros e giroscópios (GAROFALO, 2010).

Os sensores inerciais, em sua origem, eram baseados em grandes aparelhos, desenvolvidos inicialmente a partir do uso de acelerômetros. O avanço tecnológico permitiu a miniaturização destes com o advento dos MEMS³⁷ (Figura 7), assim como o aumento de sua complexidade, uma vez que estas pequenas estruturas integram acelerômetros, giroscópios e magnetômetros. A função dos elementos citados pode ser vista abaixo (GAROFALO, 2010; AMINIAN; FAVRE, 2013):

- Os acelerômetros medem a direção vertical a partir da aceleração em relação à gravidade;
- Os magnetômetros estabilizam o plano horizontal através da direção do campo magnético terrestre, como um compasso; e
- Os giroscópios são responsáveis por detectar orientação com base em vibração.

Figura 7 – Representação do sensor inercial



FONTE: Adaptado de Xsens Technologies, 2009.

³⁷ MEMS - Microelectromechanical System (Sistema Microeletromecânico)

A necessidade de calibrar cada um dos elementos torna estes sistemas de difícil manutenção, principalmente no que diz respeito aos magnetômetros. Estes modificam sua resistência na presença de campos magnéticos fortes, o que faz com que a relação entre a orientação do norte magnético se perca. Outra questão técnica que envolve este tipo de sensor está ligada ao ruído gerado no ambiente, uma vez que sensores magnéticos são perturbados por componentes ferrosos. (ROETENBERG, 2006; GAROFALO, 2010)

Aminian e Favre (2013), durante uma seção de tutorial a respeito de sistemas baseados em tecnologia inercial, colocaram que o desenvolvimento tecnológico tem permitido que questões relacionadas ao ruído gerado pelo ambiente nos sensores, assim como ao consumo energético e integração, sejam minimizadas. Também colocaram que à medida em que os sistemas são configurados de fábrica, as questões de calibragem se tornam menos problemáticas. A conclusão dos pesquisadores a respeito de tendências futuras foi que, assim como até 2002 só era possível utilizar estes sensores para estimar de forma válida em duas dimensões, a tendência daqui a alguns anos será ter mais sensores incluídos, assim como unidades processadoras integradas aos próprios sensores.³⁸

d) Sistemas Óticos

Sistemas óticos (ou stereofotogrametria), podem ser compostos por uma variedade de tecnologias. O principal fator que determina um sistema como ótico é o fato de ser baseado em imagem. Esses tipos de sistemas possuem alta precisão de rastreamento e alta taxa de amostragem (ROETENBERG, 2006; SUTHERLAND, 2001).

Os sistemas óticos possuem um alto nível de precisão, porem é necessário que o usuário esteja sempre no campo de visão. Outra limitação encontrada nos sistemas baseados em marcadores anatômicos é o mesmo encontrado em sistemas mecânicos, que são passíveis de deslocamento dos marcadores devido ao tecido mole, assim como a localização articular é estimada.

A principal divisão da categoria é entre sistemas ativos e passivos, de forma que nos sistemas ativos, o estímulo vem dos sensores, enquanto nos sistemas passivos, o estímulo vem da fonte emissora. Uma exemplificação dos sistemas ativos é a utilização de LEDs nos marcadores anatômicos. Já os sistemas passivos podem ser exemplificados com câmeras que emitem ondas infravermelhas (AMOROSO et al, s/d; SCHEPERS, 2009).

³⁸ AMINIAN, K; FAVRE, J. Human movement analysis using inertial sensors. Tutorial session. In: ISB BRAZIL. XXIV Congresso f the International Society of Biomechanics. Aug. 4th 2013. Centro de Convenções de Natal. Natal-RN. Brasil.