

Uma revisão da literatura sobre a deformação do corpo: em busca do corpo perfeito

Gabriel Caixeta Silva*

Marcos Vinícius Lenz Balatka
André Tavares da Silva

Marcelo da Silva Hounsell

Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC), Departamento de Ciência da Computação (DCC), Brasil

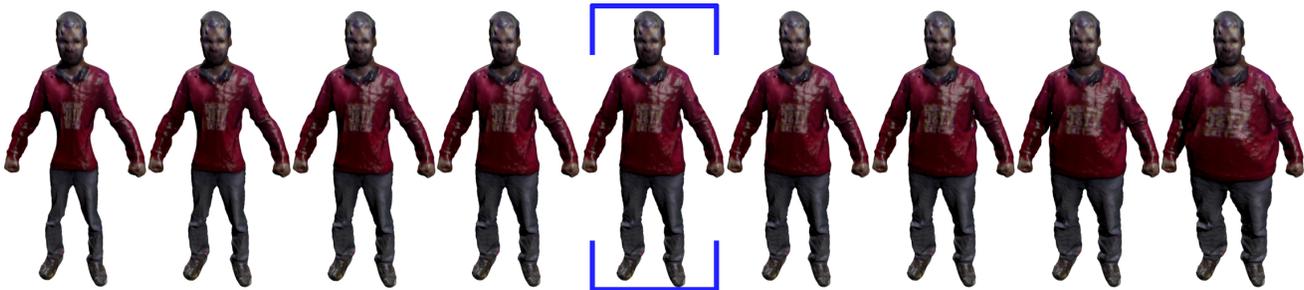


Figura 1: Escala de silhuetas de modelos 3D: Em destaque o modelo original, os outros foram produzidos a partir deste.

RESUMO

Humanos Virtuais (HV) são representações de formas e características humanas utilizadas em vários tipos de aplicações como, por exemplo, realidade virtual, simulações, jogos, treinamento, saúde e educação. A simulação de HV é um desafio que requer a solução de diversos problemas, desde a concepção dos mesmos até a deformação do modelo. Este artigo apresenta uma revisão da literatura sobre técnicas de deformação usadas em modelos 3D de HV, e como elas podem contribuir para um processo de geração de diversidade baseado em aspectos fisiológicos do corpo (como vigor físico, idade, percentual de gordura). Foi possível constatar que as deformações geométricas na malha de modelos de HV possuem níveis diferenciados de manipulação, bem como focos distintos e recorrentes (animação e multidões). Os dados mostram uma lacuna de técnicas para geração de variantes de modelos conforme critérios biológicos, entre eles o nível de obesidade, e também não parece existir uma métrica objetiva para avaliar os HV resultantes das deformações realizadas. Observa-se portanto, que esta área tem muitas aplicações e muito a crescer.

Palavras-chave: humanos virtuais, deformação, revisão.

1 INTRODUÇÃO

Humanos virtuais (HV) são representações de formas e características humanas em meio digital [14], definidos como uma representação gráfica que pode ser animada por meio de tecnologias de informática [15]. Também podem ser definidos como modelos de pessoas que podem ser usadas como substitutos de “pessoas reais” em testes ergométricos baseados em computador, para projetos de veículos, trabalho de campo, ferramentas, linhas de produção, para representações humanas do participante ou de outros em ambientes virtuais de tempo real [30]. A obtenção de um HV é um

conjunto de etapas básicas que devem ser satisfeitas como: modelagem, associação de um esqueleto à malha geométrica, texturização e animação [6]. Estas etapas podem gerar uma grande quantidade de tempo para um artista, situação que piora quando é preciso criar vários e distintos HV.

Modelos de HV vem sendo largamente utilizados em aplicações de computação gráfica, como realidade virtual, simulações e jogos [53]. Geralmente, devido à complexidade dos corpos humanos, formas realistas são construídas por um exaustivo e longo processo de design gráfico. Além disso, quando é requerida a presença de grupos ou multidões de personagens, uma diversidade de formas e tipos de animações são necessárias para popular realisticamente um ambiente virtual. Como consequência, os artistas envolvidos devem criar manualmente cada um destes personagens, aumentando a complexidade de sua tarefa e exigindo muito tempo e talento artístico [54].

Simulação de HV é um desafio e requer a solução de muitos problemas em diferentes áreas [27]. Sendo a modelagem uma destas, esta é a primeira etapa para criar um humano virtual que pode ser desenvolvido por ferramentas de escultura interativa ou por reconstrução baseada em fotos 2D, vídeo e tecnologias a *laser*.

Outro problema são as deformações do corpo que tem sido objeto de pesquisa e que ainda não está resolvido. As deformações de corpos permitem gerar uma diversidade de modelos ou criação de variantes de um modelo capturado (ou modelo), como: versão mais nova, ou velha, de um personagem; versão mais, ou menos, musculosa; versão mais magra ou gorda. Assim, este trabalho visa levantar técnicas para deformação de corpos de humanos virtuais.

Modelar ou deformar modelos de HV pode fazer uso de dados antropométricos, estes dados são medidas retiradas do corpo humano e utilizado no campo de estudo da antropometria [54]. Modelos antropométricos de humanos podem ser utilizados por um amplo número de aplicações, seja em computação gráfica ou outras áreas, como a medicina, ao permitir escalar as dimensões do corpo para facilitar a pesquisa e realizar as análises cabíveis, ou incluir/retirar características do modelo [48]. O número de aplicações de HV são ilimitados bem como as atividades humanas [27] e alguma destas aplicações podem ser descritas como:

*e-mail: caixetasilva@hotmail.com

- Indivíduos ou populações virtuais para aprendizado e treinamento baseado em simulações, desenvolvimento de habilidades, coordenação de times e tomadas de decisão [27];
- Usuários virtuais para análise ergonômica em ambientes virtuais de trabalho e veículos [43][16];
- Pacientes virtuais para a simulação de diversos tipos de cirurgias [3][12];
- Apresentadores virtuais para a TV e web [35][37];
- Manequins virtuais para a indústria têxtil [27];
- Atores virtuais para filmes, tanto para personagens principais quanto figurantes [49];
- Soldados virtuais para aplicações militares, como simulação de batalha, treinamento em equipe e operações de resgate [31];
- Análise de diferenças entre humanos que relaciona um conjunto de características que são as variantes do indivíduo [31];
- Simulação biomédica em que o ser humano é uma estrutura complexa tanto em termos físicos quanto funcionais [57].
- Análise de forma e movimento: o entendimento do que se vê e sente no mundo real deve ser transportado até o modelo do mundo virtual. Com formas geométricas e deformações de objetos mais próximas da realidade [30];
- Pessoas virtuais para análise de fatores humanos como: performance de interação afetiva em ambientes controlados; capacidades; comportamentos [31]; percepção corporal [10].

Um mapeamento sistemático da literatura [50] constatou que o foco dos trabalhos, neste tema, tem sido a área de animação e, talvez por isso, há pouca preocupação em um modelo com base na fisiologia para as deformações. Os modelos analisados no mapeamento, são em sua maioria, escaneados de pessoas reais diretamente pelos autores ou via base de dados de modelos 3D de terceiros, mas não existem preferências identificadas quanto à forma de esqueleto (para *rigging*), linguagem de programação ou padrão de arquivos utilizados. Também não parece existir uma técnica de deformação preferencial e, que o estado de técnicas de deformação que sejam orientadas a aspectos fisiológicos evidentes (como vigorexia, envelhecimento, ganho de peso, etc) tem sido pouco exploradas na literatura e se mostram uma oportunidade com benefícios para a computação gráfica (notadamente a animação) quanto outras áreas (como a da saúde).

Desta forma, o objetivo desta revisão é levantar técnicas de deformação usadas em modelos geométricos 3D de HV, e discutir como elas podem contribuir para um processo de deformação baseado em aspectos fisiológicos (como vigor físico, idade, massa de gordura, etc) do corpo a fim de produzir humanos virtuais com um corpo fisiologicamente críveis.

Este artigo está estruturado da seguinte forma: na Seção 2 são apresentadas técnicas de deformação da malha; na Seção 3 são apresentadas deformações com base no corpo do humano virtual; na Seção 4 é realizada uma discussão sobre estas deformações para a geração de humanos virtuais; e, por fim, na Seção 5 é apresentada a conclusão.

2 TÉCNICAS DE DEFORMAÇÃO DA MALHA

Para se obter a deformação de um modelo 3D, como de um personagem, seguindo uma estratégia qualquer, pode-se dividir as técnicas de deformações em dois níveis: a de deformação da malha (deformação de baixo nível) e a de controle de deformações do modelo (deformação de alto nível).

Deformações da malha são definidas como modificações aplicadas em uma geometria base onde métodos de deformação são apropriados para gerar detalhes nos modelos [1], ao realizar mudanças na forma através de abordagens que permitam uma deformação livre ou orientada a *fitting* [50].

Já as deformações aplicadas em modelos de humanos levam em conta a circunferência e tamanho de um membro do corpo, fazem uso de técnicas de deformação da malha [21] e levam em consideração como o personagem virtual está modelado, seja por superfície ou volume.

2.1 Técnicas básicas

Transformações geométricas como a translação, rotação, escala e cisalhamento são as técnicas de mais baixo nível para realizar deformações em um modelo geométrico ao manipular suas entidades (vértices, arestas e faces). Na translação é realizado o deslocamento das entidades selecionadas do modelo com base no sentido positivo ou negativo do sistemas de coordenadas. Na rotação as entidades selecionadas são rotacionadas pela alteração do ângulo a partir da sua origem. Na escala pretende-se alterar as entidades selecionadas de modo a manter a proporção de distância entre os elementos escalados, alterando o tamanho do objeto. No cisalhamento é realizado uma transformação que inclina a forma de um objeto, onde um conjunto de coordenadas altera os seus valores e outro preserva [46], conforme Figura 2.

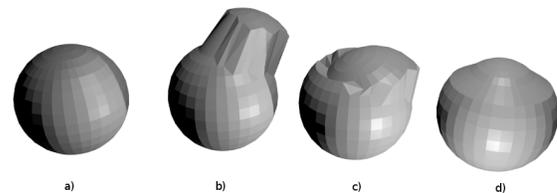


Figura 2: Deformação por translação, rotação e escala. a) malha esférica sem deformação; b) deformação por translação; c) deformação por rotação; d) deformação por escala

Deformações globais e locais são utilizadas para dar mais suavidade nas deformações. Uma deformação especificada global é uma função matemática que explicitamente modifica a coordenada global dos pontos no espaço. Já a deformação local modifica o espaço tangente a um sólido e utilizam vetores tangente e vetor normal para gerar a geometria local e sua orientação [46]. As deformações globais alteram a forma geral do modelo e incluem a estatura e o perímetro do modelo ao ajustar de forma proporcional cada parte do corpo humano. As deformações locais, realizam ajustes em detalhes específicos como espessura ou circunferência de alguma parte do corpo para se obter diversos modelos [17].

Metamorfose, também chamada de *morphing* ou *blend* [40], é uma técnica que utiliza dois objetos geométricos para gerar um novo objeto com formas intermediárias [46]. As abordagens de metamorfose podem ser divididas de acordo com a representação da forma, como por exemplo, *boundary representation* (B-Rep) e volume [40]. Esta técnica foi utilizada, por exemplo, para tentar estimar a real forma do corpo de um modelo escaneado com roupa [18]. Para isto, é utilizado um modelo gordo ou magro como referência para o *morphing*, utilizando uma função para estimação da

camada de gordura como ponto de parada da deformação, aplicado no modelo escaneado, conforme mostra a Figura 3.

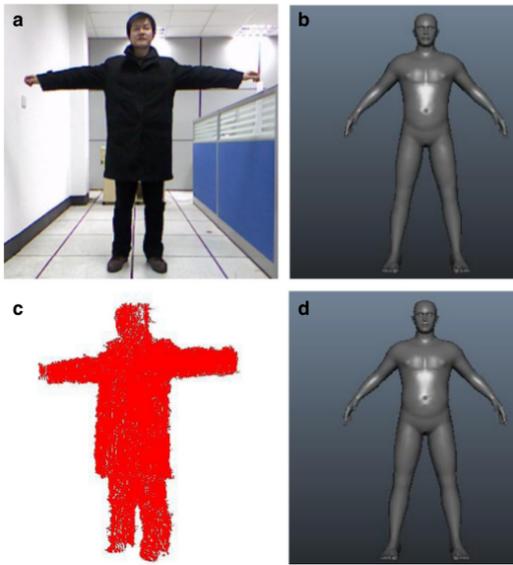


Figura 3: Exemplo Morphing em humanos virtuais [18]. a) modelo vestido com roupas de inverno; b) corpo do modelo; c) modelo escaneado da pessoa vestida; d) corpo estimado

Free-Form Deformation (FFD) [47] é uma técnica controlada por uma grade de pontos de controle definida pelo usuário e que, às vezes, são muito globais e dependentes da intuição do usuário [46]. O FFD foi desenvolvido como uma técnica para deformar modelos geométricos sólidos de maneira livre. A deformação por FFD pode ser aplicada globalmente, alterando todo o objeto, ou localmente, deformando apenas uma parte dele, e sua manipulação é intuitiva, mas sua deformação inicial é limitada por uma grade de pontos no formato de um paralelepípedo. Uma analogia física para explicar o FFD é considerar um paralelepípedo transparente, como um elástico, o qual envolve um objeto, ou vários objetos, que se deseja deformar. O objeto imaginado também é flexível, que se deforma da mesma maneira que o elástico que o envolve. A Figura 4 ilustra esta analogia usando vários objetos envoltos por uma grade de pontos de controle. A grade é deformada e as esferas envolvidos são deformados de modo consistente com o movimento dos pontos de controle no FFD cuja grade de pontos de controle estabelece uma função analítica no interior da grade [1]. Os usuários movem os pontos de controle como se fosse um modelo volumétrico, e qualquer geometria dentro do volume é deformado de acordo.

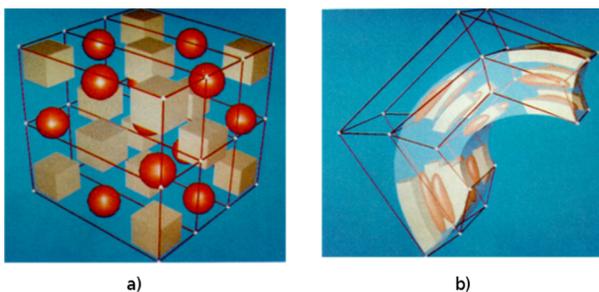


Figura 4: Exemplo FFD [47]. a) T objetos envoltos por uma grade com pontos de controle; b) objetos deformados pela mudança da posição dos pontos de controle;

Simple Constrained Deformations (SCODEF) [5] foi desenvolvido como uma forma generalizada de deformações contínuas. Baseado no FFD, nesta técnica o usuário define alguns pontos de restrição, cada um dos quais está associado a um deslocamento e um raio de alcance ou efetividade. O deslocamento de qualquer ponto a ser deformado é uma mistura de funções B-spline locais, determinadas por estes pontos de restrições. A deformação obtida pelo SCODEF é tanto local quanto intuitiva e os pontos restritos podem ser localizados na superfície limite do objeto que será deformado, conforme mostrado na Figura 5.

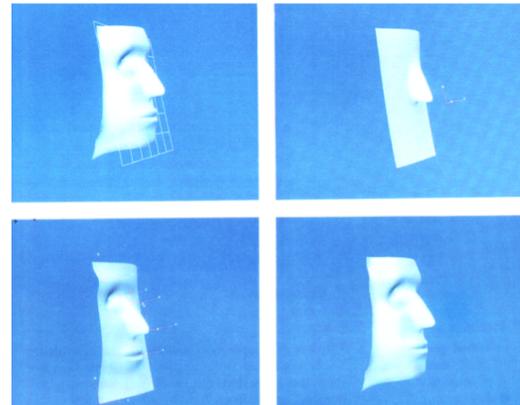


Figura 5: Exemplo do SCODEF [5].

Outros métodos baseados no FFD foram desenvolvidos como por exemplo:

- *Extended Free-form Deformation* (EFFD) [8]: permite que as grades de controle da deformação tenham outras formas. Cria-se um controle intuitivo, pela diversidade das formas da grade e combinações destas, o que permitem atender as necessidades do usuário [41];
- *Rational Free-form Deformation* (RFFD) [20]: permite aumentar o grau de liberdade da manipulação das deformações apenas alterando os pesos dos pontos de controle. Quando os pesos de cada ponto de controle são homogêneos, a deformação é equivalente ao FFD [4];
- *Nurbs Free-Form Deformations* (Nurbs-FFD) [22]: é um método FFD baseado em Nurbs (*Non Uniform Rational Basis Spline*) e que combina a deformação global e local, o que torna o controle de objetos incorporados à grade de controle mais flexível. Esta técnica não divide a grade de maneira uniforme e permite um refinamento em áreas onde a deformação é mais importante e mantida mais difícil onde é preciso conservar a forma original de um objeto [41].

A técnica *Axial Deformation* controla operações de modelagem, como escala, dobras, torções e alongamento, pela referência de alguns eixos tridimensionais incorporados ao modelo, os quais induzem as deformações desejadas no eixo e estas são consequentemente passadas para o modelo [32]. A abordagem desta técnica faz uso de eixo tridimensional, um segmento de curva ou de reta, como base para a deformação de modelos existentes. O processo consiste em posicionar este eixo no objeto a ser deformado e associar os vértices do objeto aos pontos do eixo. Também é definida uma zona de influência, que define uma porção no espaço 3D a ser deformada. Desta forma, os valores dentro desta zona sofrem deformação e os que estão fora, não. Assim, a deformação realizada no eixo é passado para os vértices do modelo. A Figura 6 demonstra como é a deformação do *Axial Deformation* utilizando zonas de

influências: à esquerda temos um eixo com uma deformação uniforme, no centro é demonstrado a zona de influência ao longo do eixo e à direita o resultado final da deformação ao longo do eixo com zonas de influência de diversos tamanhos [23].

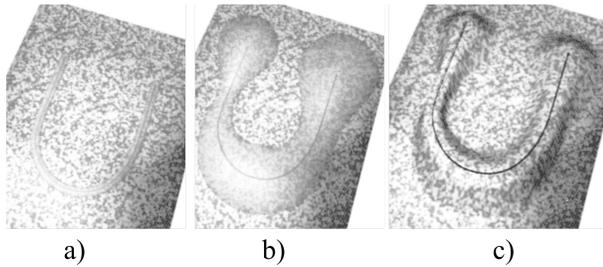


Figura 6: Exemplo Axial Deformation [23]: a) Eixo embutido em um objeto; b) Inserção das zonas de influência; c) Resultado Final

Cage-based Deformation é definida como uma técnica que envolve a geometria em uma malha de pontos de controle. Esta malha de pontos de controle, assim como o FFD, é utilizada para guiar a deformação do objeto. Porém, o método *cage-based* posiciona estes pontos de forma a se adequar mais à forma da superfície do objeto e não como uma grade. O *cage* pode ter qualquer forma, permitindo a personalização dos pontos de controles em regiões críticas, para deformações de detalhes no objeto [1]. A Figura 7, mostra a deformação de um objeto envolto pelos pontos de controle pelo *Cage-based Deformation*.

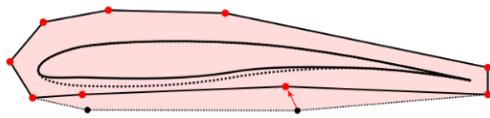


Figura 7: Exemplo Cage-based Deformation [1]

As técnicas de deformação baseadas em superfícies possuem uma função de deformação que permite deformações físicas realistas e facilitam a preservação de características geométricas na própria superfície. No entanto, a dependência de informações de malha global faz com que seu custo computacional escale com a complexidade da discretização da superfície. A qualidade da deformação é limitada pela qualidade da superfície discretizada, e também esta técnica de deformação não consegue deformar modelos volumétricos [1] (Seção 3.2).

3 DEFORMAÇÃO ORIENTADA

O processo de modelar um HV é uma das tarefas mais árduas em computação gráfica, devido a complexidade do corpo humano [2]. As deformações aplicadas ao corpo do personagem virtual podem ser de dois tipos [21]: deformações de circunferência (*girth*) e de comprimento/altura (*length/height*), conforme a Figura 8 que mostra os segmentos do corpo conforme as medidas antropométricas.

Deformações geométricas espaciais são uma tecnologia chave para a área de modelagem de HV e descrevem dois principais aspectos de aplicações que são [55]: modificar entidades básicas ou modelos existentes, ao gerar modificações, seja adicionando ou removendo características no modelo; e adicionar características de tempo em animação, ao incluir controles de deformação ao movimentar uma parte do modelo.

Para se obter deformações na aparência do humano virtual, é preciso levar em consideração como o corpo do personagem está modelado: seja por superfície (onde a superfície externa é representada); ou por volume (quando o interior do corpo é representado)

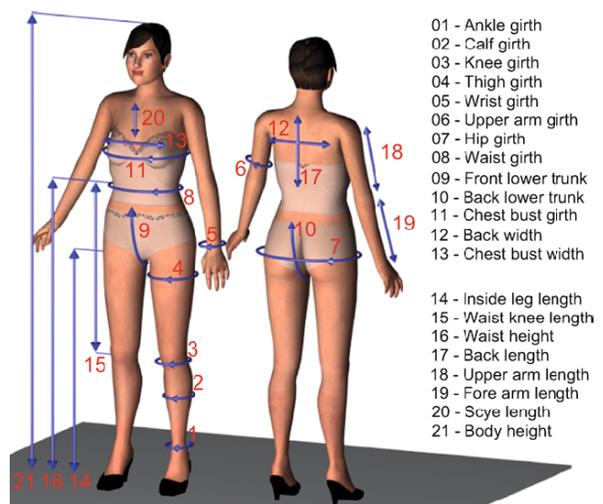


Figura 8: Pontos de medidas antropométricas do corpo [21].

3.1 Humanos virtuais modelados em superfície

Modelos baseados em superfície possuem apenas duas camadas, sendo elas uma estrutura articulada, também chamada de esqueleto, e uma camada geométrica externa chamada *skin*, que incorpora as deformações orientadas pelas camadas da estrutura articulada e podem sofrer os seguintes tipos de deformações: *Rigid Deformations*, *Local surface Operators*, *Skinning*, *Contour Deformations* e *Deformations by Exemple* [2]. Nestes modelos, propriedades cinemáticas são necessárias na estrutura articulada para que se possa criar uma representação realista quando se aplicam estes tipos de representação para animação [51], por exemplo.

Portanto, existe uma série de deformações no modelo que devem ser aplicadas quando se trata da animação das partes, para manter o mesmo com uma aparência crível; outras deformações se fazem necessárias quando a aparência é modificada devido a fatores como de envelhecer ou engordar.

3.1.1 Deformação Rígida

Nesta abordagem, um modelo simplista de uma pele consiste em um conjunto independente de malhas poligonais colocadas sobre um esqueleto. Estas malhas são ancoradas às juntas do esqueleto e são deformadas seguindo a articulação da estrutura à qual esta malha pertence. Porém, destaca-se que partes do corpo podem interpenetrar as juntas vizinhas e parecerem desconectadas durante a deformação pelo movimento da estrutura articulada [2]. Esta abordagem é fácil e rápida, porém, cada parte da pele é separada e aparentemente incoerente durante a movimentação dos segmentos [56], como mostra a Figura 9.



Figura 9: Exemplos de *Rigid Deformation* adaptado de [36]: À esquerda a forma original e à direita uma deformação rígida.

3.1.2 Local Surface Operators

Nesta abordagem os vértices da pele são mapeados para os segmentos do esqueleto, restringindo a influência de uma junta para dois segmentos conectados. Assim os vértices são deformados por funções de acordo com as restrições aplicadas em um contexto local [2]. Nesta abordagem tem-se como ideia básica que todo o segmento de pele é feito de várias partes locais, e que cada parte local vem com uma função definida [56]. Desta forma, cada pedaço da pele sempre é contínua entre si.

3.1.3 Skinning

Skinning é outra técnica de deformação que trabalha localmente. Diferente da abordagem anterior este é um algoritmo genérico o suficiente para ser aplicado a qualquer tipo de junta e as deformações podem ser controladas à mão por um artista gráfico [2]. *Skinning Deformation* são técnicas aplicadas com o intuito de gerar suavização na camada da pele em deformações aplicadas na animação [56]. Estas se referem ao processo na qual a malha é deformada como uma função de deformação de um abstrato esqueleto subjacente à pele, cujos algoritmos são chamados na literatura por *Linear Blend Skinning* (LBS) ou *Skeleton Subspace Deformation* (SSD) [25]. A ideia do LBS, ou SSD, é realizar a deformação da superfície, através de um vértice de controle, de um objeto articulado, utilizando uma soma ponderada das posições transformadas deste vértice, a Figura 10 demonstra dois efeitos desta técnica de deformação.

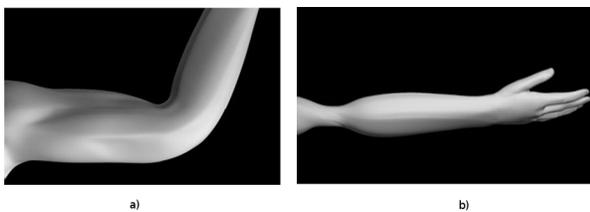


Figura 10: Exemplos *Skinning Deformation* [25]: Em a) mostra o feito da deformação atuando no bíceps e no cotovelo na pose de flexão do braço; b) O antebraço na pose de “torção”, como em girar uma alça de porta, à medida que a torção se aproxima de 180 graus, o braço colapsa na região do cotovelo.

3.1.4 Contour Deformations

O tronco humano e membros apresentam uma forma aproximadamente cilíndrica. Esta propriedade pode ser facilmente explorada considerando as diferentes partes do corpo como cilindros generalizados e manipulando as seções transversais para aproximar as deformações da pele [2]. Esta técnica agrupa os vértices em contornos, definindo a orientação e posição de cada uma, para obter uma deformação mais suave dos membros do corpo. Como as deformações não são calculadas sob um vértice individual, mas por grupos de contornos, resultados em tempo real são facilmente alcançados, a Figura 11 mostra os grupos de contornos de um braço.

3.1.5 Deformations by Example

É uma técnica que consiste em criar deformações da pele misturando exemplos pre-definidos ou formas-chaves (*key-shape*). Estas formas chaves são malhas triangulares em várias poses que são adquiridas por escâneres a laser ou por modelagem à mão. A ideia básica desta deformação é que as formas-chaves estão em um espaço abstrato o qual novas formas podem ser criadas pela interpolação ou extrapolação destas [2]. Um método baseado nesta técnica é o *Pose Space Deformation* (PSD) [26] que é uma função de poses para gerar deformações no modelo para animação.



Figura 11: Grupos de contornos, adaptado de [2]: Seção transversal dos contornos de um braço.

3.1.6 Deformação com orientação local e não local

Esta técnica utiliza orientação local e não-local como restrições para a deformação da superfície de formas 3D, suporta a fusão de malhas e que deforma uma malha enquanto preserva sua forma global e propriedades locais [52]. A orientação não local busca construir um relacionamento para cada vértice pesquisando alguns vértices com características semelhantes enquanto a orientação local busca preservar os detalhes locais da malha, sendo que estas duas orientações complementam uma à outra enquanto propaga a deformação do modelo.

3.2 Humanos virtuais modelados em volume

Modelos volumétricos baseiam-se em primitivas geométricas elementares, como as esferas e cubos, para aproximar a forma do corpo. Estes tipos de modelos foram desenvolvidos quando os sistemas de computação gráfica ainda tinham capacidades muito limitadas. E tem como características superfícies implícitas e possibilidade de colisão entre as partes do corpo [2].

3.2.1 Implicit Surfaces e Metaballs

Superfícies implícitas são frequentemente utilizadas para representar formas orgânicas devido à sua suavidade natural [2]. No campo da animação elas permitem obter fluidez nos movimentos, pois é possível animar apenas movendo as origens dos pontos. Além disso, elas permitem construir formas com topologias complexas, sendo uma técnica popular para varias tarefas de modelagem, especialmente onde estas formas são do âmbito natural [42].

Uma superfície implícita é uma isosuperfície de um dado campo escalar definido no espaço 3D. Uma das formas mais comuns das superfícies implícitas é a que utiliza a soma de potenciais dos pontos do modelo, onde é utilizado, normalmente, campos gaussianos que diminuem de acordo com a distância de seus centros. Estas formas de superfícies implícitas são conhecidas na computação gráfica como *Metaballs* ou *Blobs* [42].

Metaballs é uma técnica de deformação que realiza cortes transversais horizontais no corpo do modelo e preenche estes cortes com várias *metaballs* dentro do corpo que fazem tangência à superfície geométrica do corpo. Utilizando curvas de Bézier para dar suavidade na deformação que é realizada aumentando o raio das *metaballs* e assim induzindo a deformação na superfície do modelo geométrico [28], a Figura 12 mostra o uso das *metaballs* em um modelo humano.

3.2.2 Collision Models

Alguns modelos volumétricos permitem realizar a deformação pela manipulação de colisões entre diferentes objetos, ou diferentes partes do mesmo objeto (auto-colisão), e adequadamente gera a deformação das superfícies em contato. Este tipo de deformação incorpora propriedades elásticas diretamente dentro de uma formulação de distância baseado em superfícies implícitas e

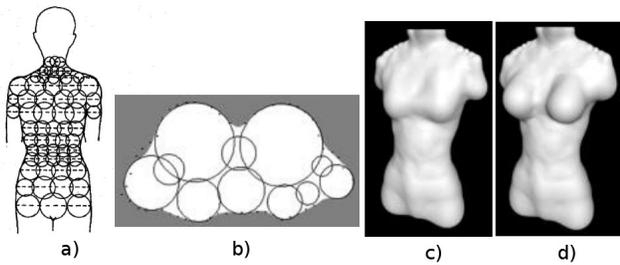


Figura 12: Exemplo de Metaballs adaptado de [28]. Em a) posicionamento das metaballs (círculos) e cortes transversais (linhas tracejadas) no modelo; b) visão transversal das metaballs; c) modelo original; d) modelo deformado pelas metaballs

também estabelece a correspondência entre deformações radiais e reação à força aplicada entre as superfícies em contato. [2].

A simulação física do material do corpo é normalmente evitada ou realizada em um processo *offline* devido ao seu alto custo computacional, porém criam uma série de deformações desejáveis, como as deformações por colisão [29]. Métodos para detectar colisões e auto-colisões em modelos deformáveis articulados permitem este tipo de técnica alterar a forma e ao mesmo tempo preservar o volume do modelo durante a animação [44].

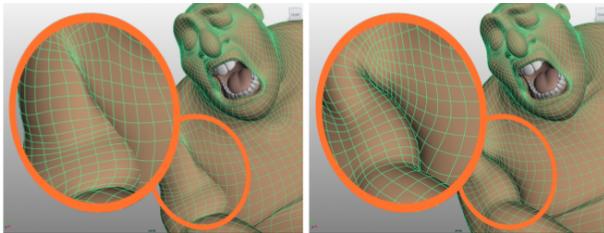


Figura 13: Exemplo de deformação por colisão [29]: à esquerda tem-se uma deformação que exhibe qualitativamente o visual certo, mas sem colisão; à direita tem-se uma deformação utilizando auto-colisão do modelo.

3.2.3 Modelos Multicamadas

Modelos multicamadas permitem gerar HV com mais ou menos atenção na acurácia anatômica do modelo. E são inspirados pela biologia real do corpo humano e tentam representar e deformar cada camada anatômica e modelar sua interação dinâmica. Estas camadas são divididas em esqueleto, músculos, gordura e pele [2].

Pode-se gerar HV apenas com base em funções de crescimentos dos músculos e da camada de gordura, o que possibilita gerar modelos gordos, magros, fortes ou fracos. Órgãos internos podem ser substituídos por um conjunto de poliedros e para que os modelos tenham um tom realista é necessário aplicar gravidade nos modelos para que as deformações ficassem aceitáveis [45]. A Figura 14 mostra um exemplo de modelo multi-camada.

Há também técnicas para criar modelos baseados em física para animação, utilizando um conjunto de dados escaneados [19]. Onde, por exemplo, constrói-se um *template* anatômico de um homem médio que suporta deformações de forma e tamanho dos ossos, músculos e camada de gordura e também deformações com base em poses do esqueleto. O modelo representa as camadas de esqueleto, músculos, de gordura e pele:

- A primeira camada tenta representar o esqueleto, que é uma estrutura articulada, de segmentos hierárquicos, descritos na

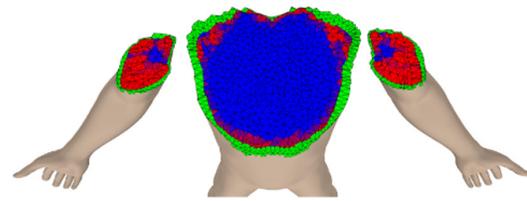


Figura 14: Exemplo de um modelo multicamada [45].

estrutura dos ossos humanos, representados por segmentos na geometria da malha ou representado por primitivas como paralelepípedos [2];

- Segunda camada tenta representar os músculos tendo como orientação a camada de esqueleto, tendo como base para as deformações o FFD e pode utilizar deformações cinemática, deformações dinâmicas, superfícies implícitas. Outro ponto é que é possível realizar as deformações representando ou não o volume do corpo [2];
- A terceira camada vem representar os tecidos de gordura e modelam o seu comportamento. Sendo frequentemente combinada com a camada de músculos, ou representado como uma espessura sob a pele, que pode ser ajustado globalmente ou localmente [2];
- A quarta camada representa a pele e pode ser modelada com qualquer tipo de superfície: poligonal, paramétrica, subdivisão e implícita. Estas podem ser deformadas de acordo com as técnicas presentes para cada tipo de superfície [2]. Esta camada pode ser deformada por abordagens que são baseadas em curva, contorno, superfície, geometria, física e anatômica [38];

3.2.4 Modelagem Volumétrica dos Órgãos

Alguns trabalhos buscam desenvolver técnicas de deformação para órgãos internos do corpo, como mostra a Figura 15. A modelagem e simulações de deformações do músculos esqueléticos de um humano podem ter diferentes níveis estruturais [24]. Uma abordagem para a simulação de humanos é através de conceitos anatômicos que pode ser dividido em três diferentes camadas: uma concepção rígida do corpo de um esqueleto real; o desenho dos músculos e sua deformação baseada em conceitos físicos; e a geração da pele [34].

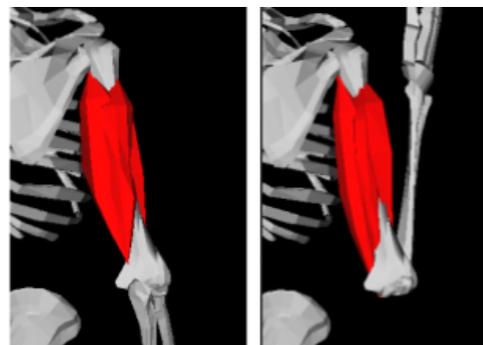


Figura 15: Flexão do cotovelo com a deformação dos músculos [34].

Deformações de órgãos internos são normalmente utilizados em simulações cirúrgicas, como por exemplo, o uso de um modelo volumétrico do intestino humano aplicado para treinamento em

simulação cirúrgica [12], onde o modelo precisa ser deformável e que durante a cirurgia sofre múltiplos deslocamentos e interações. Ou o uso de técnicas de deformações para deformar modelos 3D de vasos sanguíneos de humanos em tempo real [39].

4 TRABALHOS RELACIONADOS

Alguns trabalhos anteriores procuraram classificar as técnicas de deformações por diferentes pontos de vistas entre elas tem-se: a) Centrada na perspectiva do usuário [13]; b) Para animação de personagem [7]; c) No domínio de utilização [38];

4.1 Classificação Quanto ao Elemento de Controle

Técnicas de deformação espacial podem preservar propriedades físicas da pele ou animação do modelo [4]. Uma forma de classificar estas técnicas é de acordo com a perspectiva do usuário, baseado no uso de seus controles de manipulação em quatro grupos [13]:

- *0D Point-Based Deformations*: neste grupo, o usuário fornece um conjunto de deslocamentos, cada um composto por um ponto, juntamente com o movimento pretendido e a região de influência. O espaço que abrange todas as regiões de influência e também incorpora o objeto deformável é distorcido para combinar com o conjunto deslocamento pretendido;
- *1D Curve-Based Deformations*: aqui as deformações são controladas por uma ou mais curvas, o que pode afetar tanto o espaço inteiro quanto um volume fechado em específico. Isso pode ser visto como uma distorção do espaço para mapear as modificações em uma curva da origem ao destino ;
- *2D Surface-Based Deformations*: as deformações, neste grupo, são iniciadas por mudanças definidas pelo usuário em uma superfície. Essas superfícies podem ser alteradas pelo reposicionamento de pontos de controle, em qualquer forma de malha e topologia modificadas pela manipulação direta de seus vértices;
- *3D Volume-Based Deformations*: Neste grupo, um conjunto de pontos de controle delimitam um modelo incorporando-o a uma grade volumétrica. O reposicionamento dos pontos de controle desta grade transferem a distorção do espaço volumétrico criado para o modelo embutido.

4.2 Classificação Quanto ao Tipo de Controle

Deformações corporais focados na pele (áreas das juntas) tem recebido grande atenção na área. As abordagens de deformação de personagens virtuais podem ser divididas em duas grandes categorias [21]: métodos baseados em física e baseados em geometria. Outra classificação semelhante, porém mais detalhada é [7]:

- Métodos puramente geométricos, não consideram qualquer propriedade física na deformação do modelo geométrico, sendo eficiente para criar formas modificadas, porém menos realistas [7]. Nestes métodos, técnicas de transformação geométrica, deformações globais e locais, superfícies implícitas são utilizadas para realizar a deformação no modelo, alterando diretamente na estrutura do mesmo;
- Modelos baseados em modelagem física [11] possuem o comportamento e a forma de muitos objetos que são determinados pelas suas propriedades físicas brutas. Nos métodos baseados em física, a deformação da pele consideram a física da pele e suas camadas subjacentes. Este método pode gerar deformações mais realistas, porém não são recomendadas para aplicações que requerem alta eficiência computacional [7]. Para que este tipo de modelo possa ter características mais realísticas deve-se aplicar influências físicas, como a gravidade e inércia [45][19];

- Os métodos dirigidos a dados geram as modificações com base em exemplos conhecidos de formas da pele. Estes métodos não consideram qualquer física para as deformações, porém requerem um número suficiente de exemplos para se chegar a um realismo [7]. Nestes métodos, as técnicas de deformação dos humanos virtuais utilizam-se de dados antropométricos de um determinado grupo de pessoas, geralmente limitados por algumas variáveis como gênero, idade e etnia;

- Nos métodos controlados por curvas utiliza-se uma rede de curvas para definir uma superfície da pele. Neste método as curvas da rede são deformadas e, conseqüentemente, os quais são usados para deformar a superfície do modelo sendo mais eficientes do que os métodos baseados em física e podem ser combinados com métodos dirigidos a dados para alcançar realismo na deformação [7]. Neste tipo de técnica utiliza-se métodos como FFD e *axial deformation*.

4.3 Classificação Quanto ao Domínio de Controle

Em [38] técnicas de deformações são classificadas pelo domínio da aplicação da deformação em dois grupos:

- Modelos 2D: cujas técnicas de deformações que levam em conta curvas e contornos são utilizadas para realizar deformações em aplicações que utilizem imagens monocolor e vídeo, e que representam grosseiramente a forma do corpo humano;
- Modelos 3D: utilizam-se de técnicas para deformar modelos 3D baseados em superfície através de abordagens geométricas, físicas ou anatômicas.

5 DISCUSSÃO

A Figura 16 apresenta na forma de taxonomia uma releitura e classificação das técnicas de deformação de HV apresentadas neste artigo. Esta, permite uma visão mais abrangente da área, suas contribuições e lacunas. Ao lado das classes na figura, seguem referências que explicam, exemplificam ou demandam de deformações daquele tipo. Algumas observações complementares sobre as classes são apresentadas a seguir. Existem três abordagens para a deformação de humanos virtuais [38]: baseados em geometria, baseados em física e baseados em anatomia.

Pode-se realizar uma distinção entre os modelos baseados em física e baseados em anatomia [38]. No primeiro, pode-se modelar as camadas da pele de acordo com suas propriedades físicas. E no segundo, é criado por uma representação precisa do esqueleto, músculo e camadas de gordura. Estas técnicas geram modelos dinâmicos e realistas de um corpo articulado usando simulações físicas, porém tem uma alto custo computacional e suas aplicações são principalmente em simulações offline e animação.

Técnicas de deformação do corpo podem ser classificadas quanto ao foco: a pele (*skin*), devido a mudanças de pose (para animação), como visto na Seção 4; anatomia, devido a mudanças antropométricas, étnicas, fisiológicas (para geração de variantes) estas afetam todas as partes do modelo mas em proporções diferentes conforme as mudanças (de crescimento, engorda, variações étnicas, etc). Independente de qual classe ou foco, elas se valem de técnicas de deformações de malha (FFD, morphing, etc) que foram vistas na Seção 2 e técnicas de deformações orientadas como visto na Seção 3.

Dentre as técnicas de deformação anatômicas pode-se classificá-las em:

- Direta: quando aplicam-se técnicas de deformação de malha básicas de forma diferente em partes do modelo [58];
- Por exemplo: quando se tem modelos alvo como referências e se consegue interpolar para obter modelos novos [9];

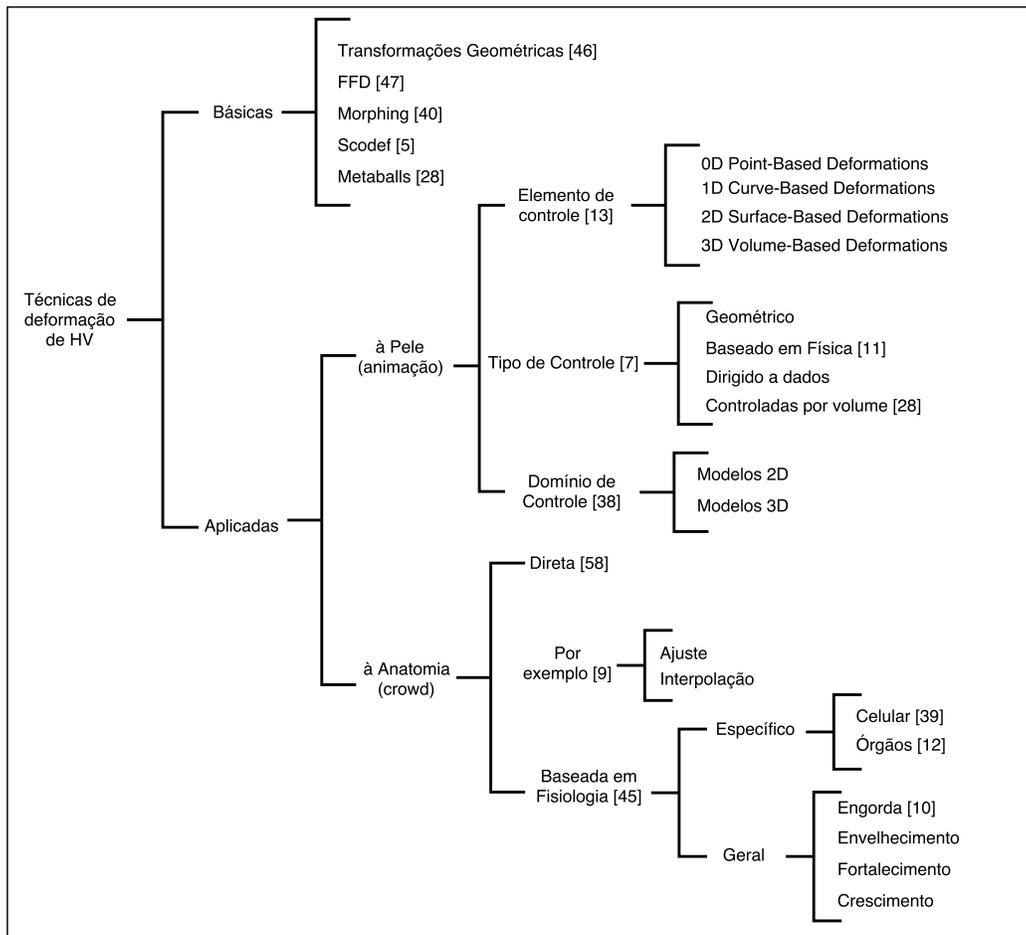


Figura 16: Proposta de classificação das técnicas de deformação

- Baseado em Fisiologia: quando se modela a repercussão dos efeitos fisiológicos nas anatomias do corpo, como visto em [45].

A deformação anatômica direta [58] permite de modo interativo e manual o ajuste do modelo, em partes, para se criar uma variante qualquer. Permite grande flexibilidade na deformação mas também é laboriosa e depende da experiência em anatomia do modelador.

A deformação baseada em exemplos pode ser gerada de duas formas: ajuste ou interpolação. Um ajuste de modelo por exemplo, toma um modelo de trabalho (escaneado de alguém) e o analisa para se encaixar em um modelo-alvo, mais próximo (onde a proximidade é dada pelo critério fisiológico). Para funcionar, estas técnicas requerem uma ampla base de modelos contemplando todas as variáveis referentes (sexo, idade, etnia, índice de massa corporal, entre outras).

A deformação baseada na fisiologia simula os efeitos biológicos e para tanto agrega conhecimento específico como o de órgãos internos (em vários níveis de detalhamento, desde fibras e células [24][39] até grandes grupos anatômicos [45]), ou regras de comportamento gerais para os fenômenos fisiológicos envolvidos como: variações das proporções do tamanho dos membros do corpo de asiáticos e europeus; variações das proporções de crescimento das partes conforme ganho/perda de peso; variações do tamanho das partes do corpo conforme o tipo físico [49]; variações do crescimento das partes do corpo conforme o crescimento/envelhecimento; variações do tamanho das partes do corpo

conforme a variação do vigor físico; entre outros;

Na classe das deformações anatômicas baseadas na fisiologia associados às regras de comportamento gerais para os fenômenos fisiológicos, parece existir uma lacuna quanto a regras que permitam as deformações de modelos, como por exemplo, sua condição de obesidade (caracterizada pelo IMC ou BVI). O IMC, Índice de Massa Corporal, foi baseado na observação de que o peso do corpo era proporcional ao quadrado da altura em adultos, o qual é um parâmetro fortemente relacionado com riscos metabólicos e cardiovasculares e nas últimas décadas com a obesidade, que são agrupados em faixas de IMC [33]. Já o BVI, *Body Volume Index* ou Índice de Volume Corporal, é um método recente de medir a obesidade, de forma mais acurada e consistente, que utiliza o escaneamento tridimensional de uma pessoa e segmenta a forma do corpo em 8 partes, as quais geram o volume do corpo e permite diferenciar pessoas que estejam no mesmo grupo de IMC [33]. Estes dois índices poderiam, por exemplo, compor uma técnica aplicada em deformações anatômicas do corpo e gerar modelos com base em níveis de obesidade conforme o IMC, como mostra a Figura 17. Bem como outras condições que possam ser associadas ao envelhecimento, fortalecimento e crescimento.

As técnicas baseadas em deformações anatômica, poderiam incluir pessoas que possuam alguma característica física especial como, por exemplo, a dificuldade de locomoção, seja por causa de uma doença ou falta de um membro, que por ventura, possa ter um comportamento de deformação diferente de uma pessoa dita sem

uma característica em especial, e assim poder gerar corpos de HV que representem diversas formas e características do copo.



Figura 17: Modelos com vários níveis de obesidade. Imagem adaptada de [10]

Vale ressaltar que esta geração de variantes de HV carece de uma forma mais rigorosa de avaliação. As avaliações das deformações são baseadas na percepção visual dos autores ao comparar suas técnicas com outras já existentes. Este tipo de avaliação pode ser identificada, principalmente, quando são comparadas deformações aplicadas à pele. Percebe-se que não existe uma métrica objetiva para se analisar o quão crível é uma deformação.

Um exemplo deste tipo de avaliação é mostrado na Figura 18 em que são apresentados poses do braço de um modelo real e deformações geradas por duas técnicas de deformação da pele de modo estático (*static*) e dinâmica (*dynamic*) [7]. Neste caso, a avaliação é feita pela observação visual de qual técnica se aproxima da forma do braço real.

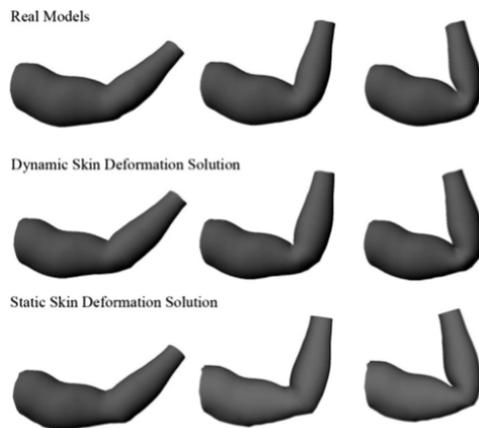


Figura 18: Comparação de deformações aplicadas a um braço [7]

6 CONCLUSÃO

Este artigo analisou como as deformações geométricas na malha de modelos de Humanos Virtuais (HV) tem sido utilizadas. Identificou-se que tem níveis diferenciados (baixo nível, direto nos pontos da malha, quanto alto nível), bem como foco distintos e recorrentes (como a pele e a anatomia do corpo). Duas vertentes parecem se sobressair na necessidade destas técnicas: animação (movimentação de personagens) e geração de multidões (*crowd*). A primeira, vem recebendo grande atenção na literatura, pois é mais premente para gerar qualquer personagem que receba uma ação (andar, correr, etc) em uma cena gráfica e por isso mais focada na alteração visual da pele do modelo. A segunda, multidões, vem recebendo atenção mais recentemente, pois requer técnicas dirigidas por outras áreas e/ou que requerem modelagem mais complexa, baseada na anatomia do corpo.

Em especial, identificou-se uma lacuna de técnicas que gerem variantes de modelos conforme critérios fisiológicos, entre eles o nível de obesidade (característica cada vez mais evidente na

população). E também, parece não existir uma métrica objetiva para avaliar a qualidade da deformação.

Observa-se uma dificuldade inerente à área: além da dificuldade e carência em técnicas para geração de variantes corporais baseadas em critérios anatômicos fisiológico, há falta de critérios objetivos para avaliar os resultados oriundos de eventuais propostas. Isto torna muito complexo encontrar o corpo correto, o perfeito, que represente o HV sob aquela influência fisiológica (como a engorda). O resultado deve ser ao mesmo tempo íntegro geometricamente, fácil de manipular graficamente, mas também crível. Só assim as propostas terão utilidade não só na área da animação, mas também em aplicações na área da saúde. Espera-se que a classificação apresentada aqui, sirva como reflexão para a área de computação gráfica e possa fomentar a criação de mais e novas técnicas baseadas em critérios anatômico fisiológicos.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer à CAPES, Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, pela bolsa de estudos disponibilizada através do Programa de Demanda Social. E também ao CNPQ, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, à FAPESC, Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Santa Catarina, através do Programa de Apoio à Pesquisa (PAP) e à FITEJ, Fundação Instituto Tecnológico de Joinville, pelo patrocínio parcial a este projeto.

REFERÊNCIAS

- [1] G. Anderson, M. Aftosmis, and M. Nemec. Parametric Deformation of Discrete Geometry for Aerodynamic Shape Design. In *AIAA Paper 2012*, Aerospace Sciences Meetings, pages 1–18, 2012.
- [2] A. Aubel. Body Deformations. In *Handbook of Virtual Humans*, pages 140–160. Wiley Online Library, 2006.
- [3] A. Ayoub, Y. Xiao, B. Khambay, J. Siebert, and D. Hadley. Towards building a photo-realistic virtual human face for craniomaxillofacial diagnosis and treatment planning. *International Journal of Oral and Maxillofacial Surgery*, 36(5):423 – 428, 2007.
- [4] D. Bechmann. Space deformation models survey. *Computers & Graphics*, pages 571 – 586, 1994.
- [5] P. Borrel and A. Rappoport. Simple constrained deformations for geometric modeling and interactive design. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, pages 137–155, 1994.
- [6] H. Braun, V. J. Cassol, R. Hocevar, F. P. Marson, and S. R. Musse. Crowdvis: a framework for real time crowd visualization. In *Proceedings of the 28th Annual ACM Symposium on Applied Computing*, pages 989–995, 2013.
- [7] E. Chaudhry, S. Bian, H. Ugail, X. Jin, L. You, and J. J. Zhang. Dynamic skin deformation using finite difference solutions for character animation. *Computers & Graphics*, pages 294 – 305, 2015.
- [8] S. Coquillart. Extended free-form deformation: A sculpturing tool for 3d geometric modeling. *SIGGRAPH Comput. Graph.*, pages 187–196, Sept. 1990.
- [9] A. Feng, D. Casas, and A. Shapiro. Avatar reshaping and automatic rigging using a deformable model. In *Proceedings of the 8th ACM SIGGRAPH Conference on Motion in Games - SA '15, MIG '15*, pages 57–64, New York, NY, USA, 2015. ACM.
- [10] E. P. Ferrari. *Construção e validação de um instrumento digital para avaliação da imagem corporal infantil*. PhD thesis, Programa de Pós-Graduação em Ciências do Movimento Humano da Universidade do Estado de Santa Catarina, 2016.
- [11] J. D. Foley, J. F. Hughes, A. Van Dam, and S. K. Feiner. *Computer graphics: principles and practice*. Addison Wesley, 2 edition, 1996.
- [12] L. France, J. Lenoir, A. Angelidis, P. Meseure, M.-P. Cani, F. Faure, and C. Chaillou. A layered model of a virtual human intestine for surgery simulation. *Medical Image Analysis*, 9(2):123 – 132, 2005. Medical Simulation - Delingette.
- [13] J. Gain and D. Bechmann. A survey of spatial deformation from a user-centered perspective. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, pages 107:1–107:21, Nov. 2008.

- [14] H. Hoffmann, R. Schirra, P. Westner, K. Meinken, and M. Dangelmaier. *iTeach: Ergonomic Evaluation Using Avatars in Immersive Environments*, pages 365–373. Springer, Berlin, Heidelberg, 2007.
- [15] M. Holzwarth, C. Janiszewski, and M. M. Neumann. The influence of avatars on online consumer shopping behavior. *Journal of marketing*, pages 19–36, 2006.
- [16] H. Honglun, S. Shouqian, and P. Yunhe. Research on virtual human in ergonomic simulation. *Computers & Industrial Engineering*, 53(2):350 – 356, 2007. Selected Papers from The 27th. International Conference on Computers & Industrial Engineering - Part 2.
- [17] L. Huang and C. Gao. Nonuniform Parametric Human Body Based on Model Reuse. In *2014 5th International Conference on Digital Home*, pages 406–411, nov 2014.
- [18] L. Jun, Z. Mingmin, P. Zhigeng, W. Shengbo, and Y. Zheng. Creating real body model of dressed human based on fat extent of body. *Multimedia Tools and Applications*, pages 6951–6966, 2015.
- [19] P. Kadlecěk, A.-E. Ichim, T. Liu, J. Křivánek, and L. Kavan. Reconstructing personalized anatomical models for physics-based body animation. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, pages 1–13, 2016.
- [20] P. Kalra, A. Mangili, N. M. Thalmann, and D. Thalmann. Simulation of facial muscle actions based on rational free form deformations. *Computer Graphics Forum*, pages 59–69, 1992.
- [21] M. Kasap and N. Magnenat-Thalmann. Skeleton-aware size variations in digital mannequins. *Visual Computer*, pages 263–274, 2011.
- [22] H. J. Lamoussin and N. N. Waggenspack. Nurbs-based free-form deformations. *IEEE Computer Graphics and Applications*, pages 59–65, Nov 1994.
- [23] F. Lazarus, S. Coquillart, and P. Jancène. Axial deformations: an intuitive deformation technique. *Computer-Aided Design*, pages 607–613, 1994.
- [24] R. R. Lemos, J. Rokne, G. V. G. Baranoski, Y. Kawakami, and T. Kurihara. Modeling and simulating the deformation of human skeletal muscle based on anatomy and physiology. *Computer Animation and Virtual Worlds*, pages 319–330, 2005.
- [25] J. Lewis. *Learning from the Artist: Theory and Practice of Example-Based Character Deformation*. PhD thesis, Victoria University of Wellington, 2016.
- [26] J. P. Lewis, M. Cordner, and N. Fong. Pose space deformation: A unified approach to shape interpolation and skeleton-driven deformation. In *Proceedings of the 27th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*, SIGGRAPH '00, pages 165–172, 2000.
- [27] N. Magnenat-Thalmann and D. Thalmann. *Handbook of Virtual Humans*. John Wiley & Sons, 2006.
- [28] R. Matsuda and T. Nishita. Modeling and deformation method of human body model based on range data. In *Shape Modeling and Applications, 1999. Proceedings. Shape Modeling International '99. International Conference on*, pages 80–87, Mar 1999.
- [29] A. McAdams, Y. Zhu, A. Selle, M. Empey, R. Tamstorf, J. Teran, and E. Sifakis. Efficient elasticity for character skinning with contact and collisions. In *ACM SIGGRAPH 2011 Papers*, pages 1–12, New York, NY, USA, 2011.
- [30] F. A. C. Modesto. Implementação de uma ferramenta para geração de movimentos parametrizados para humanos virtuais. Master's thesis, Centro Universitário Eurípides de Marília, 2005.
- [31] F. A. C. Modesto et al. *Humanos Virtuais e Avatares*, volume 8, pages 79–97. Sociedade Brasileira de Computação, 2006.
- [32] M. E. Mortenson. *Geometric modeling*. New York, NY : Industrial Press Inc., 3 edition, 2006.
- [33] D. Muralidhara. Come 2020!; welcome body volume index!!; bye bye body mass index!!! *Integrative Obesity and Diabetes*, pages 26–27, 2015.
- [34] L. P. Nedel and D. Thalmann. Modeling and deformation of the human body using an anatomically-based approach. In *Proceedings of Computer Animation 98.*, pages 34–40, Jun 1998.
- [35] T. Noma, L. Zhao, and N. I. Badler. Design of a virtual human presenter. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 20(4):79–85, Jul 2000.
- [36] J. F. Oliveira, D. Zhang, B. Spanlang, and B. F. Buxton. Animating scanned human models. In *Journal of WSCG*, pages 1–19, 2003.
- [37] D. Oyarzun, M. Lehr, A. Ortiz, M. del Puy Carretero, A. Ugarte, K. Vivanco, and A. García-Alonso. *Using Virtual Characters as TV Presenters*, pages 225–236. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2007.
- [38] H. Pan, H. Huo, G. Cui, and S. Chen. Modeling for deformable body and motion analysis: A review. *Mathematical Problems in Engineering*, pages 1–14, 2013.
- [39] J. Park, M. Shim, S.-Y. Park, Y. Kang, and M.-S. Kim. Realistic deformation of 3d human blood vessels. *Computer Animation and Virtual Worlds*, 24(3-4):317–325, 2013.
- [40] J. Parus, I. Kolingerová, and M. Málková. Multimorphing: A tool for shape synthesis and analysis. *Advances in Engineering Software*, pages 323 – 333, 2009.
- [41] R. Raffin. *Free Form Deformations or Deformations Non-Constrained by Geometries or Topologies*, pages 49–74. Springer Netherlands, Dordrecht, 2013.
- [42] M. d. S. Ramos Júnior. Uma ferramenta para modelagem de formas 3d a partir de desenhos à mão livre usando superfícies de convolução. Master's thesis, Universitat Politècnica de Catalunya, 2012.
- [43] D. Regazzoni and C. Rizzi. Digital human models and virtual ergonomics to improve maintainability. *Computer-Aided Design and Applications*, 11(1):10–19, 2014.
- [44] N. A. Rumman, M. Schaerf, and D. Bechmann. Collision detection for articulated deformable characters. In *Proceedings of the 8th ACM SIGGRAPH Conference on Motion in Games*, MIG '15, pages 215–220, New York, NY, USA, 2015. ACM.
- [45] S. Saito, Z.-Y. Zhou, and L. Kavan. Computational bodybuilding. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, pages 1–12, 2015.
- [46] V. Savchenko and A. Pasko. Shape Modeling. *Encyclopaedia of Computer Science and Technology*, pages 311–346, 2002.
- [47] T. W. Sederberg and S. R. Parry. Free-form deformation of solid geometric models. In *Proceedings of the 13th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*, SIGGRAPH '86, pages 151–160, New York, NY, USA, 1986.
- [48] H. Seo. Anthropometric Body Modeling. *Handbook of Virtual Humans*, pages 75–98, 2006.
- [49] A. T. d. Silva. Geração automática de populações de personagens virtuais. Master's thesis, Universidade do Vale do Rio dos Sinos - UNISINOS, 2005.
- [50] G. C. Silva, M. S. Tavares, A. T. d. Silva, and M. d. S. Hounsell. Virtual Human Deformation: A Systematic Literature Mapping. In *1º Simpósio Latino-Americano de Jogos*, pages 146–153, Araranguá, SC, 2016.
- [51] A. Sinav. Analysis and modeling of the virtual human interface for the marg body tracking system using quaternions. Master's thesis, Naval Postgraduate School, Monterey, California, 2002.
- [52] Y. Tang, D. Zou, J. Li, and X. Chen. Local and nonlocal guidance coupled surface deformation. In *SIGGRAPH Asia 2014 Technical Briefs*, SA '14, pages 1–4, New York, NY, USA, 2014.
- [53] D. Thalmann and S. R. Musse. *Crowd simulation*. Springer, London, 2 edition, 2013.
- [54] R. C. C. Vieira, C. A. Vidal, and J. B. Cavalcante-Neto. Manipulação corporal de personagens virtuais por deformações de medidas antropométricas. In *Symposium on Virtual and Augmented Reality*, pages 102–111, 2010.
- [55] H. Wang, S. Sun, T. Shu, F. Shi, and J. Wu. Survey: Parameterized 3d human body modeling and geometric deformation technology. In *2009 IEEE 10th International Conference on Computer-Aided Industrial Design Conceptual Design*, pages 1486–1493, 2009.
- [56] R. Yang, D. Li, Y. Hu, J. Liu, and D. Hu. Rapid skin deformation algorithm of the three-dimensional human body. In *2015 7th International Conference on Intelligent Human-Machine Systems and Cybernetics*, volume 2, pages 244–247, 2015.
- [57] X. Yu, Y. Shi, H. Yu, T. Liu, J. An, L. Zhang, Y. Su, and K. Xu. Digital human modeling and its applications: Review and future prospects. *Journal of X-ray science and technology*, 23(3):385–400, 2015.
- [58] L. Zhengdong and S. Shuyuan. Free-form deformation algorithm of human body model for garment. In *2010 International Conference on Computer Application and System Modeling (ICCASM 2010)*, volume 11, pages 602–605, 2010.