

# Idealização, Projeto e Construção de um Braço Digitalizador 3D

Higor Rodrigues Cioqueta<sup>1</sup>, Francisco Paulo Lépore Neto (Orientador)<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Faculdade de Engenharia Elétrica – Universidade Federal de Uberlândia (UFU)  
Caixa Postal 533 – 38.408-100 – Uberlândia – MG – Brasil

<sup>2</sup>Faculdade de Engenharia Mecânica – Universidade Federal de Uberlândia (UFU)  
Caixa Postal 533 – 38.408-100 – Uberlândia – MG – Brasil

hrcioquetta@uol.com.br, lepore@mecanica.ufu.br

***Abstract.** The purpose of this project is construct and validate a three-dimensional digitalization arm with five degrees of freedom for application in mechanics and biomechanics systems and to auxiliary a numeric model through finite elements. The morphologic characteristics of the studied object will be obtained by the geometric model application from the sensor point of the articulated mechanism. The clouds of 3D points gained, is digitized and then transmitted for a CAD system. The result is a geometric computing model of the 3D object studied.*

***Resumo.** O propósito deste projeto é construir e validar um braço digitalizador tridimensional com cinco graus de liberdade para uso em sistemas mecânicos e biomecânicos e para auxiliar a modelagem numérica através de elementos finitos. As características morfológicas do objeto em estudo serão obtidas pela aplicação do modelo geométrico direto à ponta sensora do mecanismo articulado. A nuvem de pontos 3D obtida é digitalizada e então transportada para um sistema CAD. O resultado é um modelo geométrico computacional do objeto 3D em estudo.*

## 1. Introdução

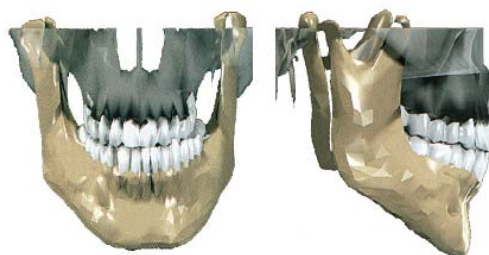
A modelagem geométrica é uma ferramenta computacional extensivamente utilizada em aplicações científicas e de engenharia. Tradicionalmente a geração dos modelos geométricos é realizada através de sistemas CAD/CAE/CAM tipicamente comerciais. Frequentemente surge a necessidade da criação de modelos tridimensionais de objetos reais já existentes, ou seja, a partir de superfícies desconhecidas construir o modelo geométrico. Este processo de reconstrução é normalmente denominado de “engenharia reversa” [Varady, 1997].

Em muitas situações, como na Figura 1, as ferramentas clássicas de modelagem 3D presentes nos sistemas de CAD são inadequadas para se modelar, de forma satisfatória, objetos morfológicamente complexos (características típicas à superfícies de forma livre, como em elementos biológicos).

A cada ano que passa novas tecnologias surgem para facilitar a geração de modelos tridimensionais dentro dos diversos sistemas CAD existentes no mercado,

porém, grande parte dessas tecnologias ainda é limitada quando se torna necessário a modelagem a partir de peças reais ou modelos físicos existentes.

Ainda hoje, uma série de empresas auxiliadas por artistas plásticos criam seus produtos baseados em esculturas modeladas em argila, isopor ou outro material apropriado. Há também aquelas que possuem uma série de peças antigas, produzidas por métodos convencionais e que necessitam fazer pequenas alterações para produzir um novo ferramental. A dificuldade surge no momento em que os modelos são gerados apenas fisicamente, o que impede sua manipulação e qualquer tipo de alteração. A solução a ser aplicada para que se possa trabalhar com esses modelos é digitalizá-los e portá-los para um sistema CAD eficiente [Berg, 1997].



**Figura 1: Modelo geométrico computacional de uma mandíbula humana**

Os equipamentos usados na digitalização e obtenção de imagens tridimensionais são genericamente denominados “scanners 3D”. Existe uma infinidade de métodos capazes de desempenhar esta função, como mostrado na Figura 2. Basicamente eles se dividem em métodos de “contato” e “sem contato”. Neste primeiro tipo, a superfície é tocada usando uma sonda mecânica na extremidade de um braço articulado ou uma máquina de medição de coordenadas. Já os “sem contato” podem ser magnéticos, acústicos ou ópticos.

Os métodos de digitalização sem contato são bastante flexíveis, práticos, podendo ser totalmente automáticos, sendo os ópticos os mais populares. No entanto, a precisão dimensional no processo de digitalização destes dispositivos está intimamente ligada com seu alto custo.

Em contrapartida, os scanners de contato (especialmente de braço articulado, com um princípio de funcionamento mais simples e com grande facilidade de uso) apesar de possuírem o processo de digitalização manual, conseguem boa precisão a um custo relativamente baixo.



**Figura 2: Métodos de digitalização**

Um braço digitalizador articulado é um versátil sistema de digitalização 3D que pode trabalhar em uma série de ambientes e com diversos sistemas, além do que, pode ser utilizado na digitalização de objetos produzidos em qualquer tipo de material como: metal, plástico, cera, madeira, etc. Com alta performance e versatilidade no processo de digitalização 3D, permite ao usuário trabalhar de forma rápida e precisa na criação de modelos tridimensionais computadorizados apenas traçando por sobre o contorno do objeto a ser digitalizado. A Figura 3 apresenta aplicações envolvendo braços digitalizadores. Uma das grandes vantagens deste sistema é poder alcançar regiões de difícil acesso por processos convencionais de digitalização, como por exemplo: depressões, cavidades e áreas de sombra.

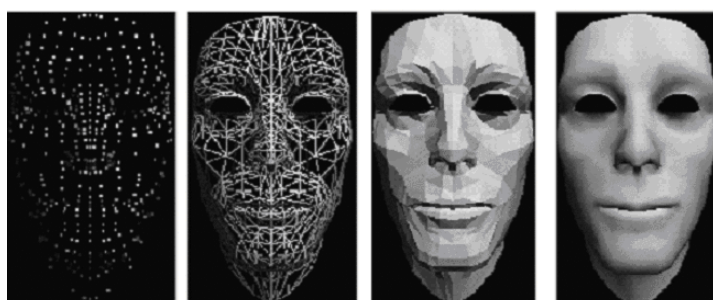


**Figura 3: Exemplos de digitalização 3D com braço articulado.**

O processo de reconstrução tridimensional a partir de digitalizadores do tipo braço articulado consiste primeiramente em adquirir a nuvem de pontos. Posteriormente a isso, são aplicados algoritmos que estabelecem a conectividade entre os pontos da nuvem. Uma vez obtida a conectividade, utiliza-se outro algoritmo com o intuito de formar uma malha poligonal. Os algoritmos mais comumente utilizados para tal finalidade são: a Triangulação de Delaunay e o Diagrama de Voronoi [Farin, 1990].

Construída a malha poligonal, o modelo é exportado para um sistema CAD para que possam ser aplicadas técnicas de computação gráfica.

A Figura 4 mostra as etapas de reconstrução tridimensional a partir de sistemas do tipo braço articulado.



**Figura 4: Etapas da reconstrução tridimensional**

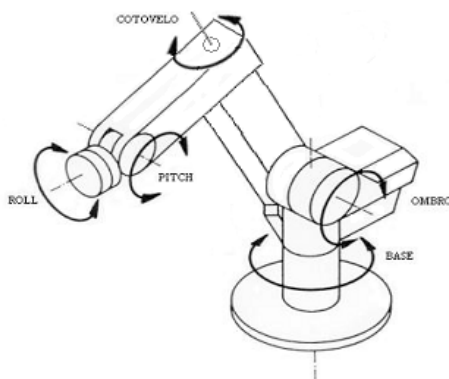
Neste contexto, o presente projeto consiste na execução de todas as etapas para a concepção de um sistema digitalizador tridimensional baseado em braço articulado. As etapas do trabalho envolvem: projeto e construção da estrutura mecânica; instrumentação das articulações (sensores); driver de comunicação serial com um microcomputador e, software de aquisição e interpretação da nuvem de pontos

(preparação dos dados para porta-los a um sistema CAD). O trabalho está sendo executado no Laboratório de Sistemas Mecânicos da Universidade Federal de Uberlândia, com o intuito de auxiliar no processo de modelagem aplicado a análise de elementos finitos, especialmente na área biomecânica.

## 2. Descrição

O braço digitalizador proposto neste trabalho (similar à Figura 5) consiste em uma estrutura clássica antropomórfica com 5 graus de liberdade (gdl), sendo todos de rotação. Cada articulação do braço é instrumentada, alimentando o computador com o valor de suas rotações ao longo do tempo.

Assim quando o usuário, movendo o punho do mecanismo, percorre sobre o contorno do objeto a ser digitalizado, os valores de cada articulação são adquiridos pelo computador, que através do modelo geométrico direto do braço, calcula e armazena na memória a posição (x,y,z) da ponta sensora: operação de digitalização 3D.



**Figura 5: Braço articulado**

Conseqüentemente o rastro digitalizado fornece os dados para a construção da superfície adquirida. Estes dados consistem em uma nuvem de pontos digitalizados. Ao percorrer toda a superfície, o mapeamento completo da geometria é estabelecido.

Após o objeto “escaneado”, com a nuvem de pontos digitalizada, estes dados são pós-processados em um algoritmo numérico para tratamento de nuvem de pontos (engenharia reversa). Este procedimento computacional deve ser capaz de ler, ordenar, corrigir e conectar os pontos. Além disso, deve ser possível reproduzir esta superfície em matemática NURBS, e exporta-la para sistemas de CAD/CAE/CAM, tais como: LabView<sup>®</sup>, AutoCad<sup>®</sup>, Matlab<sup>®</sup>, MicroStation<sup>®</sup>, Ansys<sup>®</sup>, etc.

Porém, alguns problemas podem surgir quando os modelos são digitalizados. Um desses problemas é o tratamento necessário a nuvem de pontos gerada no processo de digitalização. A partir do momento em que é gerada a nuvem de pontos, ela deve ser suavizada, tratada e corrigida para que posteriormente possa ser exportada para um sistema CAD. Essa parte do processo de engenharia reversa é um dos mais importantes, pois, é justamente a análise da nuvem de pontos que garante a geração de superfícies de boa qualidade [Varady, 1997].

O aplicativo final para tratamento de nuvem de pontos é um software desenhado para a reconstrução automática de superfícies a partir de uma nuvem de pontos existente

ou imediatamente gerada. Tem a versatilidade que permite ao usuário importar dados gerados por outros sistemas de scanners e digitalizadores 3D, além de trabalhar com dados capturados on-line do braço digitalizador desenvolvido.

### 3. Análise cinemática e modelo geométrico direto

O problema cinemático de manipuladores se divide em dois: o modelo direto e o modelo inverso. No primeiro caso, as variáveis que representam a posição de cada junta do mecanismo são os parâmetros de entrada enquanto que a posição e a orientação no espaço do órgão terminal são as saídas do sistema. No caso do modelo cinemático inverso, o objetivo é a partir de uma dada posição no espaço, calcular quais devem ser os valores a serem aplicados em cada junta do mecanismo para que o órgão terminal se sobreponha àquele ponto desejado.

No caso do braço articulado proposto neste trabalho, será necessário calcular apenas o modelo cinemático direto, visto que, os parâmetros de entrada são os valores obtidos dos “encoders”, posicionados em cada articulação. O objetivo final é calcular a posição no espaço da ponta sensora.

Considerando um dispositivo de  $n$  graus de liberdade e um sistema de coordenadas homogêneas associado a cada uma das juntas, o problema cinemático direto consiste em determinar a matriz de transformação homogênea  $T_0^n$  que relaciona a posição e orientação da ponta sensora do braço articulado com a base do sistema de coordenadas. O algoritmo consiste em [Carvalho, 1986]:

1. Calcular a matriz  $T_{i-1}^i$  de transformação homogênea que relaciona a  $i$ -ésima referência com a referência anterior a ela ( $i-1$ ). Para isto faz-se uso dos parâmetros das juntas;
2. Uma vez obtidas todas as matrizes  $T_{i-1}^i$ , obtém-se  $T_0^n$  através de:

$$T_0^n = T_0^1 \cdot T_1^2 \cdot T_2^3 \cdot \dots \cdot T_{n-1}^n$$

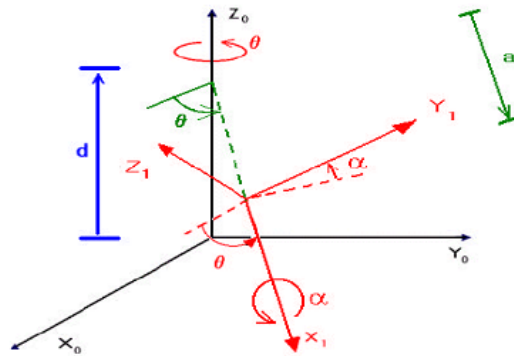
Como  $T_0^n$  depende das variáveis das juntas, o problema cinemático direto se resolve com a obtenção da matriz de transformação homogênea que fornece a posição e orientação da ponta do robô em relação a base.

Para o cálculo de cada matriz  $T_{i-1}^i$ , que relaciona a  $i$ -ésima referência com a referência anterior a ela, utiliza-se a convenção de Denavit-Hartenberg.

#### 3.1. Representação de Denavit-Hartenberg

A representação de Denavit-Hartenberg consiste em obter uma série de parâmetros que relacionam, através de transformações geométricas, dois sistemas de coordenadas.

A Figura 6 mostra dois sistemas de coordenadas alocados, cada um, em uma respectiva articulação, a saber:  $X_0Y_0Z_0$  e  $X_1Y_1Z_1$ . O objetivo é obter a matriz de transformação homogênea que relaciona o sistema de coordenadas  $X_1Y_1Z_1$  com o sistema de coordenadas  $X_0Y_0Z_0$ .



**Figura 6: Parâmetros de Denavit-Hartenberg**

A convenção de Denavit-Hartenberg estabelece que a transformação homogênea  $T_{i-1}^i$  entre quaisquer dois sistemas de coordenadas (solidários a dois elos consecutivos), através de uma cadeia cinemática de um manipulador composto de elos rígidos, separados por uma junta, pode ser escrita por até quatro matrizes de transformações homogêneas básicas.

A série de transformações homogêneas consiste em [Angele, 1997]:

1. Provocar uma rotação de  $\theta^\circ$  em relação a  $Z_0$ , ou seja,  $\text{rot}(\theta, Z_0)$ .
2. Transladar o sistema  $X_1Y_1Z_1$  de 'd' unidades ao longo de  $Z_1$ , ou seja,  $\text{trans}(0,0,d)$ .
3. Transladar o sistema  $X_1Y_1Z_1$  de 'a' unidades ao longo de  $X_1$ , ou seja,  $\text{trans}(a,0,0)$ .
4. Provocar uma rotação de  $\alpha^\circ$  em torno do eixo  $X_1$ , ou seja,  $\text{rot}(\alpha, X_1)$ .

Assim, a matriz que relaciona o sistema 1 com o sistema 0 de coordenadas, pode ser escrita como:

$$T_{i-1}^i = \begin{bmatrix} \cos\theta_i & -\cos\alpha_i \cdot \text{sen}\theta_i & \text{sen}\alpha_i \cdot \text{sen}\theta_i & a_i \cdot \cos\theta_i \\ \text{sen}\theta_i & \cos\alpha_i \cdot \cos\theta_i & -\text{sen}\alpha_i \cdot \cos\theta_i & a_i \cdot \text{sen}\theta_i \\ 0 & \text{sen}\alpha_i & \cos\alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

#### 4. Simulação Numérica do Modelo Geométrico

Com o objetivo de validar a representação matemática do modelo cinemático direto, foi elaborada uma série de rotinas computacionais com o auxílio do Matlab<sup>®</sup>.

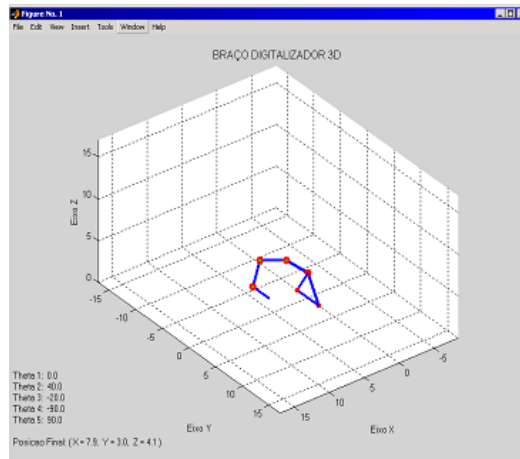
A rotina calcula a matriz de transformação que relaciona a posição da ponta sensora com a base do robô. Para isto, são fornecidos os valores que correspondem aos ângulos de rotação de cada junta em um determinado instante.

O resultado é a posição da ponta sensora no espaço em relação a um sistema de coordenadas acoplado na base do braço articulado. Para efeitos de visualização, foi anexada ao simulador, uma rotina que mostra graficamente uma possível orientação do braço robótico de acordo com os ângulos lidos de cada encoder.

Para um determinado ponto no espaço, existem diferentes combinações possíveis para os valores dos ângulos das juntas. Seria necessária a construção do

modelo cinemático inverso para determinar quais são todas as possíveis combinações de valores para as juntas do mecanismo articulado que representariam o mesmo ponto no espaço do volume de trabalho. Porém, tal tarefa não tem relevância no cumprimento dos objetivos do projeto.

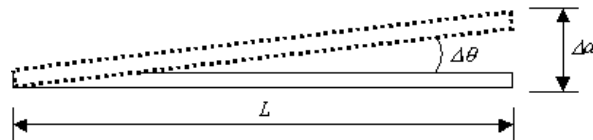
A Figura 7 mostra o resultado da simulação para os seguintes valores:  $\theta_1= 0^\circ$ ,  $\theta_2= 40^\circ$ ,  $\theta_3= -20^\circ$ ,  $\theta_4= -90^\circ$ ,  $\theta_5= 90^\circ$ .



**Figura 7: Resultado da simulação**

## 5. Análise do erro

O erro máximo cometido pela ponta sensora do equipamento está relacionado à precisão de leitura dos sensores acoplados a cada articulação (o deslocamento angular) e ao comprimento de cada link do sistema articulado.



**Figura 8: Cálculo do erro de medida**

A Figura 8 mostra um link de comprimento  $L$  e precisão de leitura do sensor de deslocamento angular dado por  $\Delta\theta$ . Nestas condições, a imprecisão de medida  $\Delta d$  para este link, será dada pela seguinte expressão [Carvalho, 1986]:

$$\Delta d = L \cdot \Delta\theta$$

Para determinar o erro de medida na ponta sensora do mecanismo articulado em relação a base é necessário somar os erros de medida acumulados para cada elo do sistema. Assim, o erro máximo será dado pela seguinte expressão:

$$e(L_n, \Delta\theta_n) = \sum_{m=1}^n L_n \cdot \Delta\theta_n$$

## 5. Considerações Finais

O projeto aqui apresentado encontra em fase de execução no Laboratório de Processos de Sistemas Mecânicos da Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia.

Com os resultados da simulação o projeto se encontra na etapa de concepção da estrutura mecânica juntamente com as especificações para a instrumentação do mecanismo. No primeiro caso, está sendo utilizado a plataforma MicroStation® (um sistema CAD para o projeto de estruturas mecânicas). Com relação à instrumentação, está sendo projetado um driver de comunicação utilizando microcontroladores PIC.

Em linhas gerais, a função deste driver é monitorar os cinco sensores do tipo encoder. A cada alteração no valor de um determinado encoder, uma interrupção no PIC atualizará as variáveis que registram o deslocamento angular de cada junta. Estes dados serão enviados ao computador via interface serial todas as vezes que o usuário solicitar ao mecanismo articulado que capture um determinado ponto no espaço.

Posteriormente, será desenvolvido um software que possibilite a iteração entre o mecanismo e o usuário. O objetivo do software será obter a nuvem de pontos do objeto a ser digitalizado pelo braço articulado e exportá-la para um sistema convencional do tipo CAD/CAE/CAM, para que então, a superfície possa ser trabalhada utilizando técnicas de computação gráfica.

## 6. Referências

- Carvalho, J. C. M. “Contribuição no estudo dos robôs Manipuladores”, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, 1986.
- Farin, Gerald E. “Curves and surfaces for computer aided geometric design”, 2<sup>nd</sup> ed. Academic Press, 1990.
- Rogers, David F., “Mathematical elements for computer graphics”, Second Edition, McGraw-Hill, Inc., 1990.
- Angele, J., “Fundamentals of Robotic Mechanical Systems – Theory, Methods and Algorithmus”, Springer, 1997.
- M. de Berg, M. van Kreveld, M. Overmars, O. Schwarzkopf, “Computational Geometry”, Algorithms and Applications, Springer 1997.
- Varady T., Martin R. R., Cox J., “Reverse engineering of geometric models – an introduction, *Computer-Aided Design*”, Vol. 29, No. 4, pp. 255-268, 1997.