

Desenvolvimento de *software*
e *hardware* para um
digitalizador de pontos 3D

Léo Jonathan Faht

Paulo César Rodacki Gomes

Roteiro

- Introdução
- Fundamentação teórica
- Especificação
- Implementação
- Resultados
- Conclusões
- Extensões

Introdução

- Aplicação de digitalização 3D
 - Dificuldade para modelar objetos
 - Digitalização do objeto real
- Etapas da digitalização
 - Coleta de coordenadas
 - Tratamento das coordenadas coletados

Objetivos

- Desenvolver o *hardware* para coletar coordenadas da superfície do objeto
- Desenvolver o *software* que se comunique com o *hardware* e realize a triangulação da nuvem de pontos
- Desenvolver o *software* que permita visualizar o objeto digitalizado em diversos ângulos

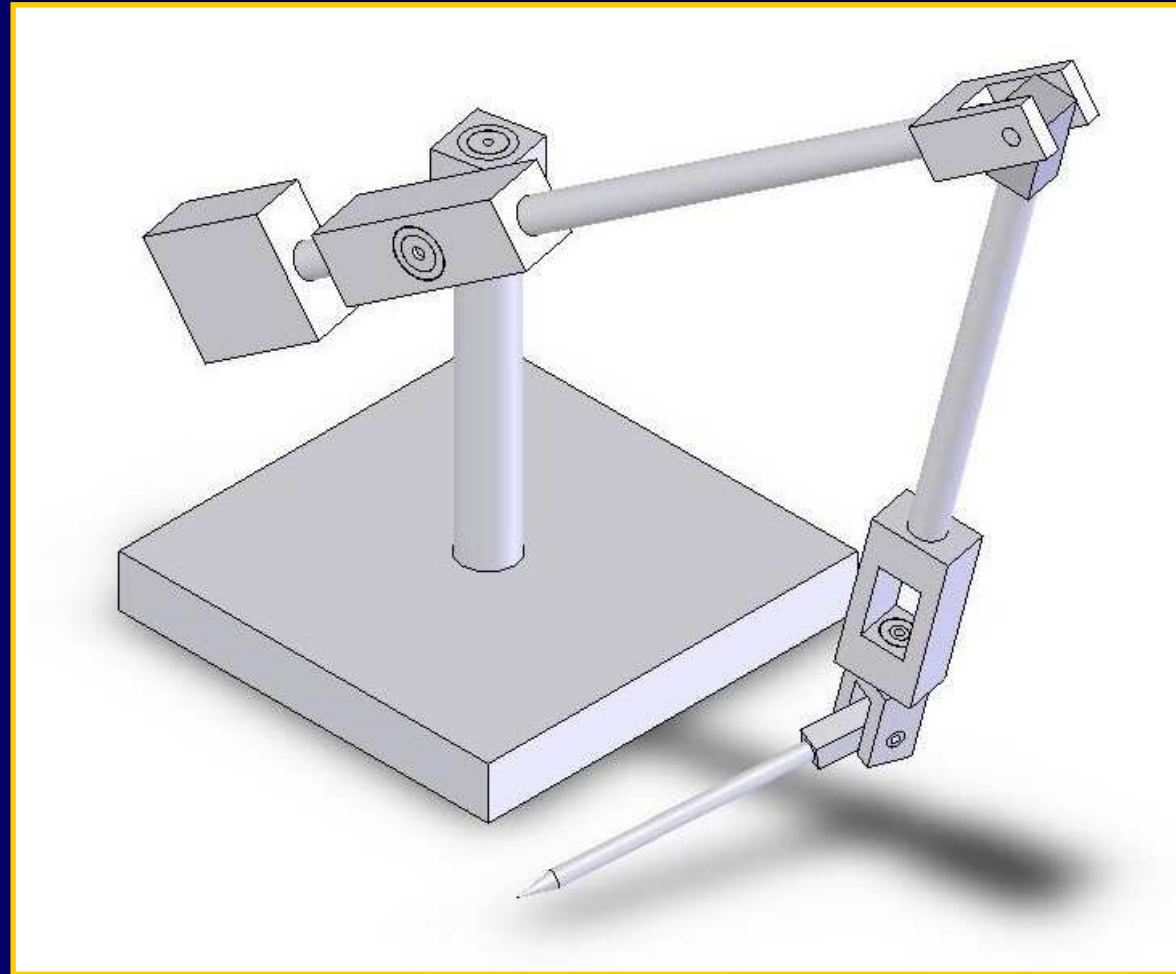
Ferramentas / Técnicas

- Linguagem C++
 - IUP – Criação de interface (portabilidade)
 - OpenGL
 - VGL – Controle de visualização do objeto
- Técnica de digitalização através de toque
- Transformações geométricas
- Triangulação

Hardware para digitalização

- Braço digitalizador
 - Estrutura composta por elos e articulações
 - Liberdade de movimento semelhante ao braço humano
 - Ponta sensora
 - Necessidade de monitoramento das articulações

Braço Digitalizador

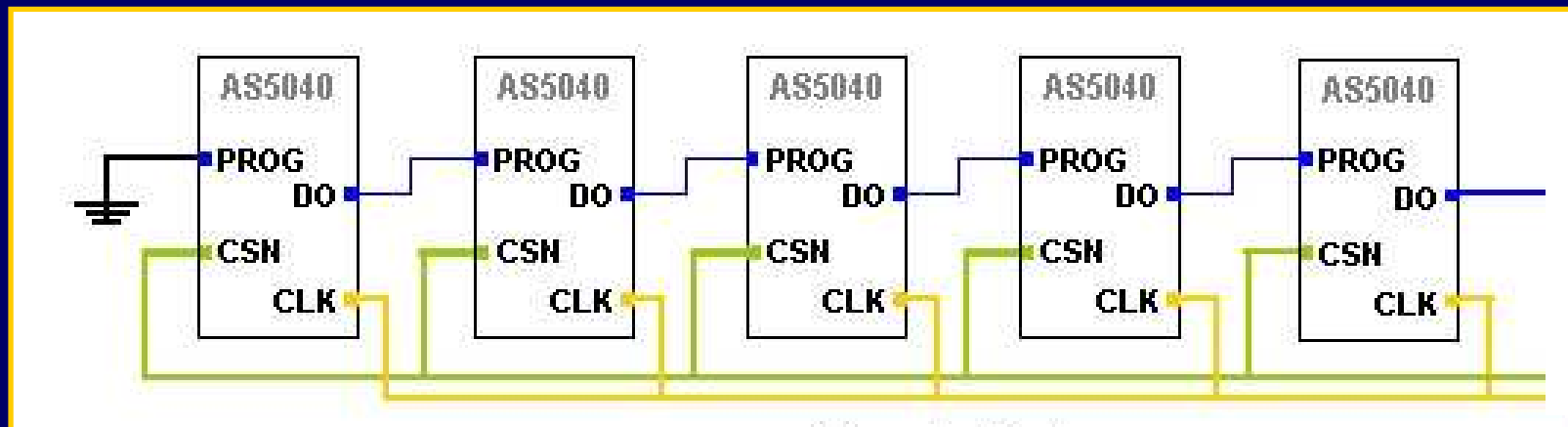
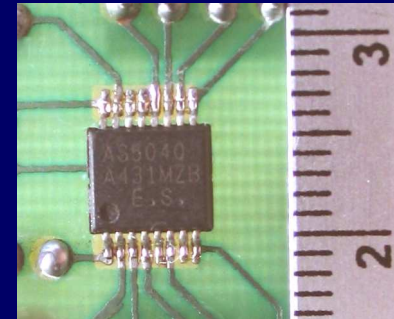


Encoder

- Converte movimento angular em pulsos digitais
- Saída
 - Incremental
 - Absoluta
- Tecnologia utilizada
 - Óptica
 - Magnética

Encoder Magnético AS5040

- Circuito integrado (5,3mm x 6,2mm)
- Magnetos específicos
- Saída absoluta de 10 bits
- Ligação em cascata



Reconstrução de superfícies

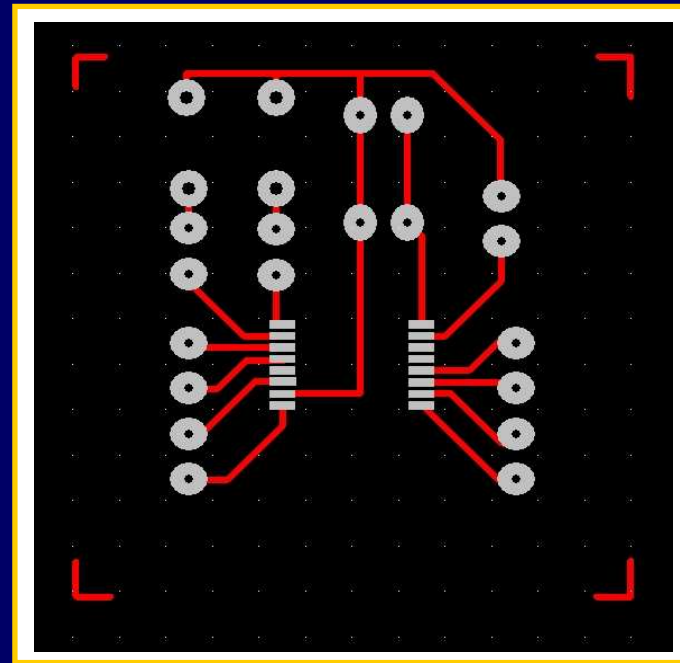
- Superfícies são representadas através de uma malha triangular
- Técnicas existentes se dividem em:
 - Esculpimento
 - Função implícita
 - Incrementais
 - Deformáveis
 - Família Crust
 - * Densidade da nuvem de pontos

Requisitos do *hardware*

- Fácil manuseio
- Boa mobilidade
- Permitir que sejam capturados pontos em um raio de 1 metro a partir da sua base
- Solicitar ao computador a captura de uma coordenada
- Quando solicitado pelo computador, deve enviar os valores atuais dos sensores

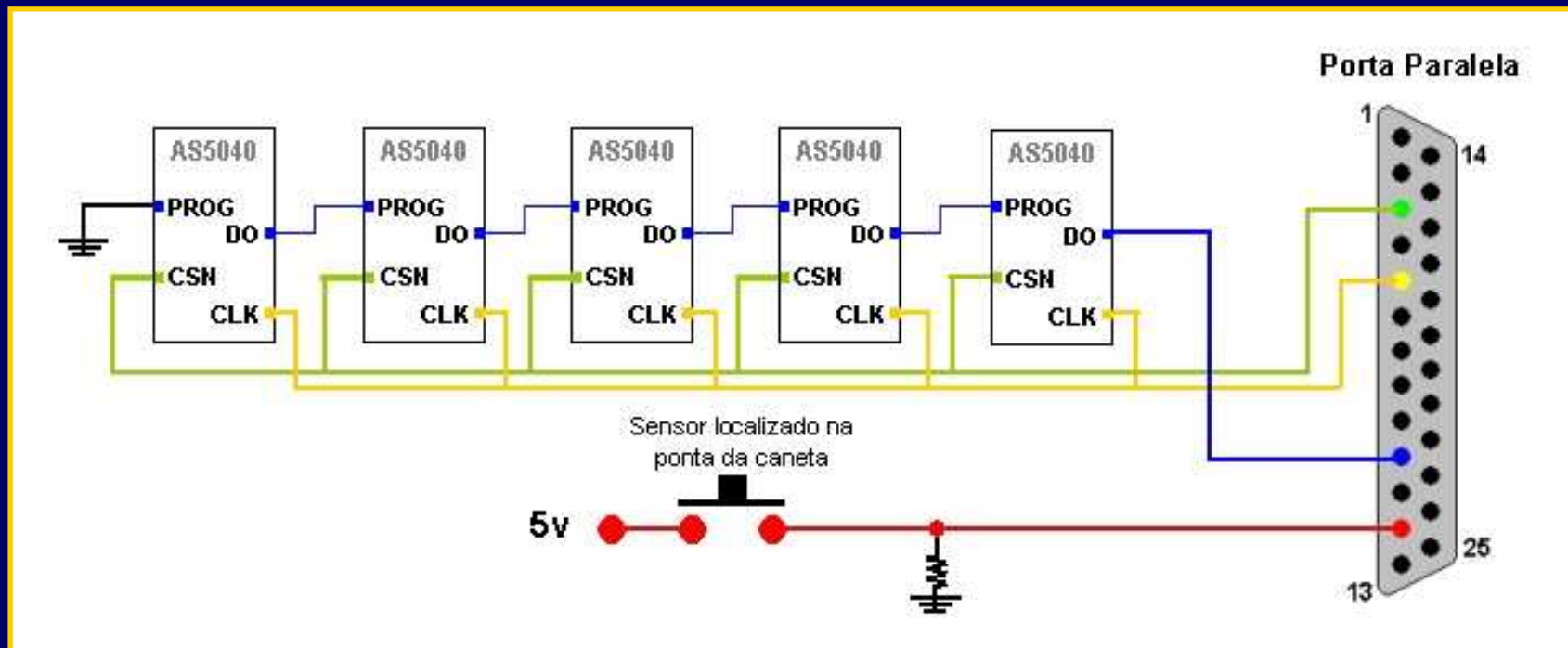
Especificação do *hardware*

- Composto por 5 juntas rotativas
- Deve possuir *encoders* em cada uma das suas articulações
- Sensores devem ser inicialmente calibrados
- Necessidade de placas de adaptação para os sensores



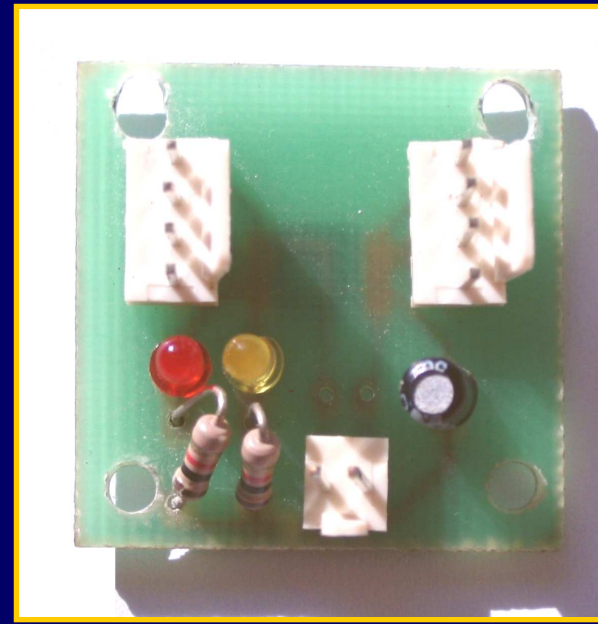
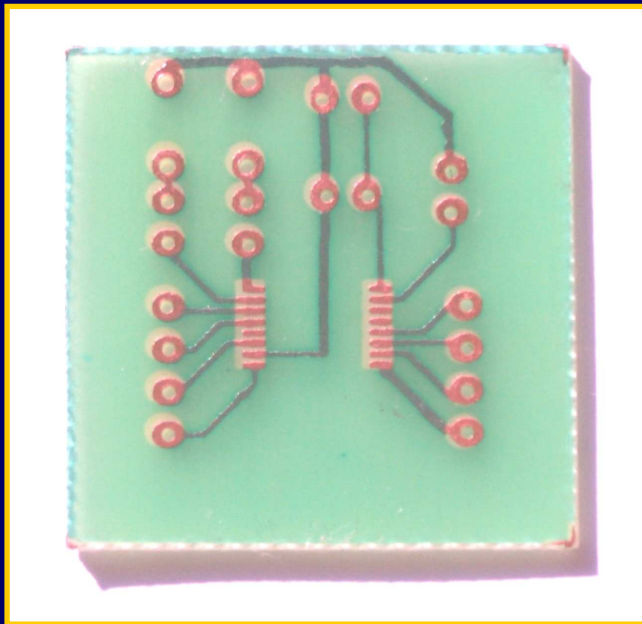
Especificação do *hardware*

- Sensores ligados em cascata
- Sensor para perceber o toque no objeto

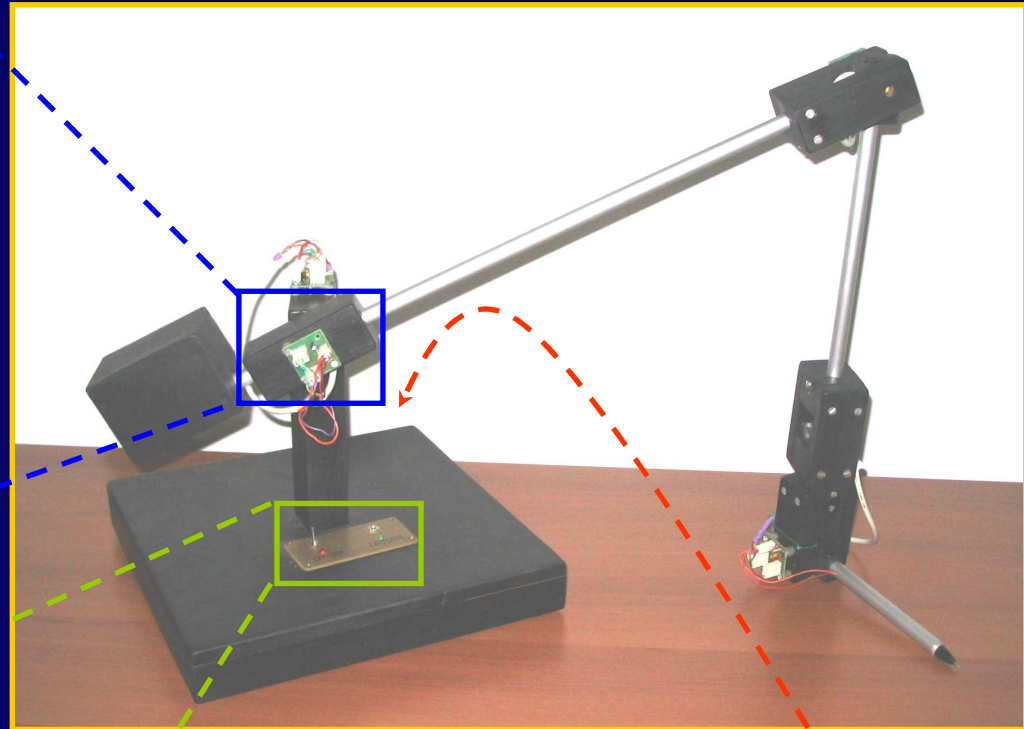
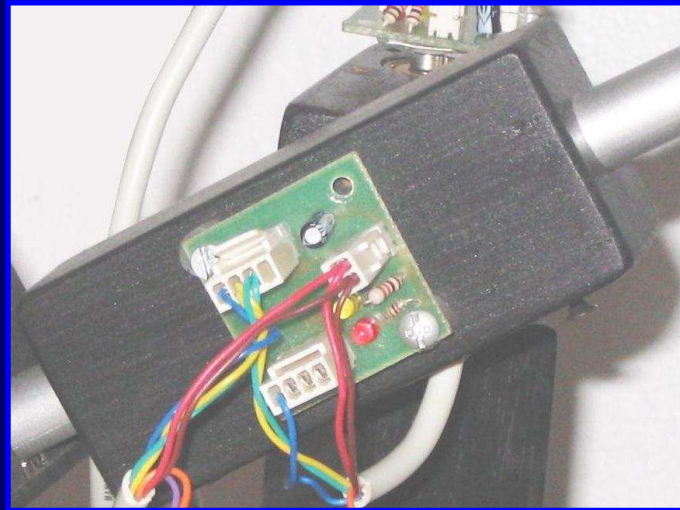


Implementação *hardware*

- Peças construídas utilizando madeira
- Montagem das peças
- Confecção das placas de adaptação e solda dos componentes



Implementação do *hardware*



Requisitos do software

- Monitorar o *hardware* para saber quando realizar a leitura
- Realizar a leitura dos sensores
- Calcular a posição final da caneta com os valores dos sensores
- Armazenar as coordenadas lidas na memória
- Triangular os pontos, gerando uma malha triangular que represente o objeto digitalizado

Especificação do software

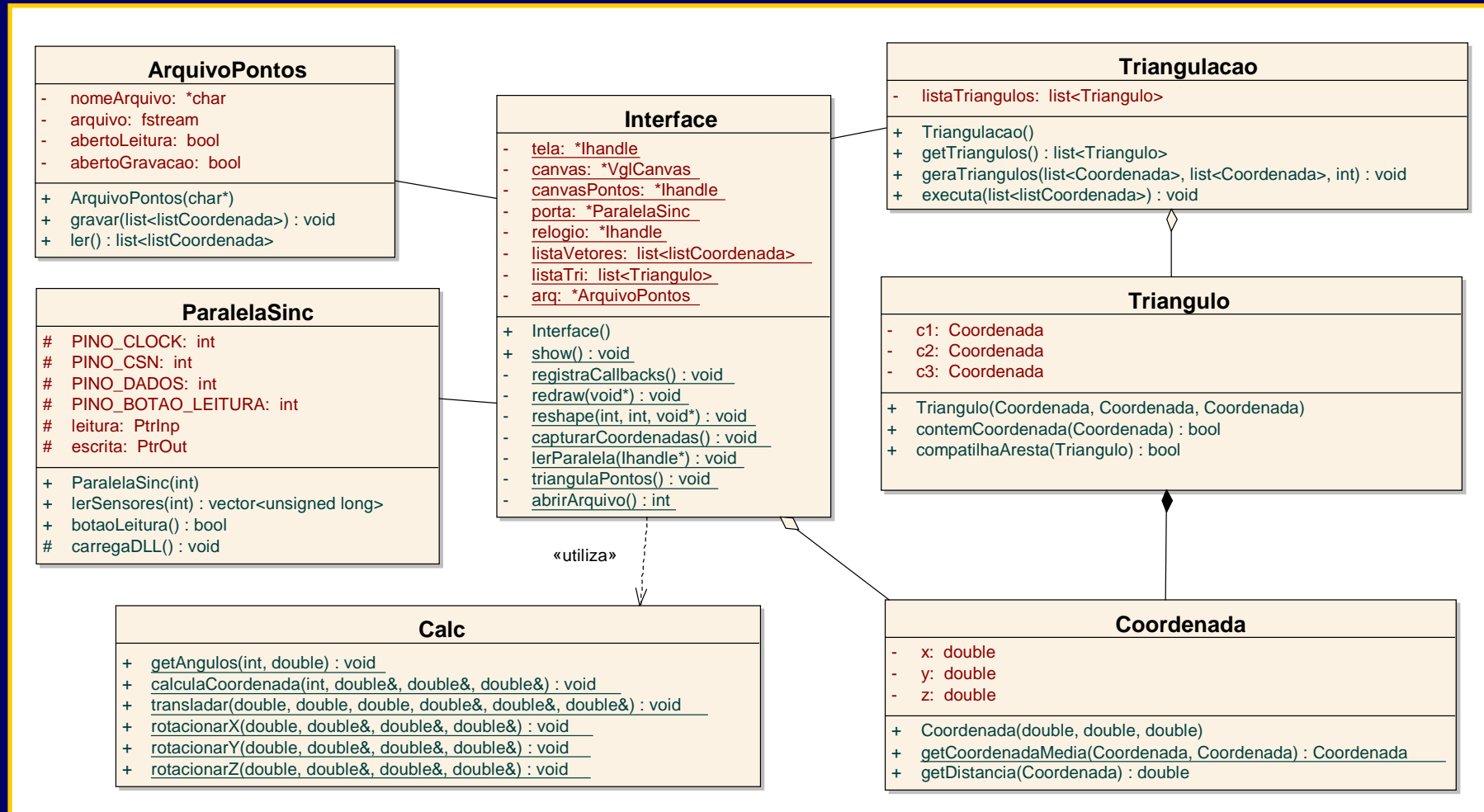
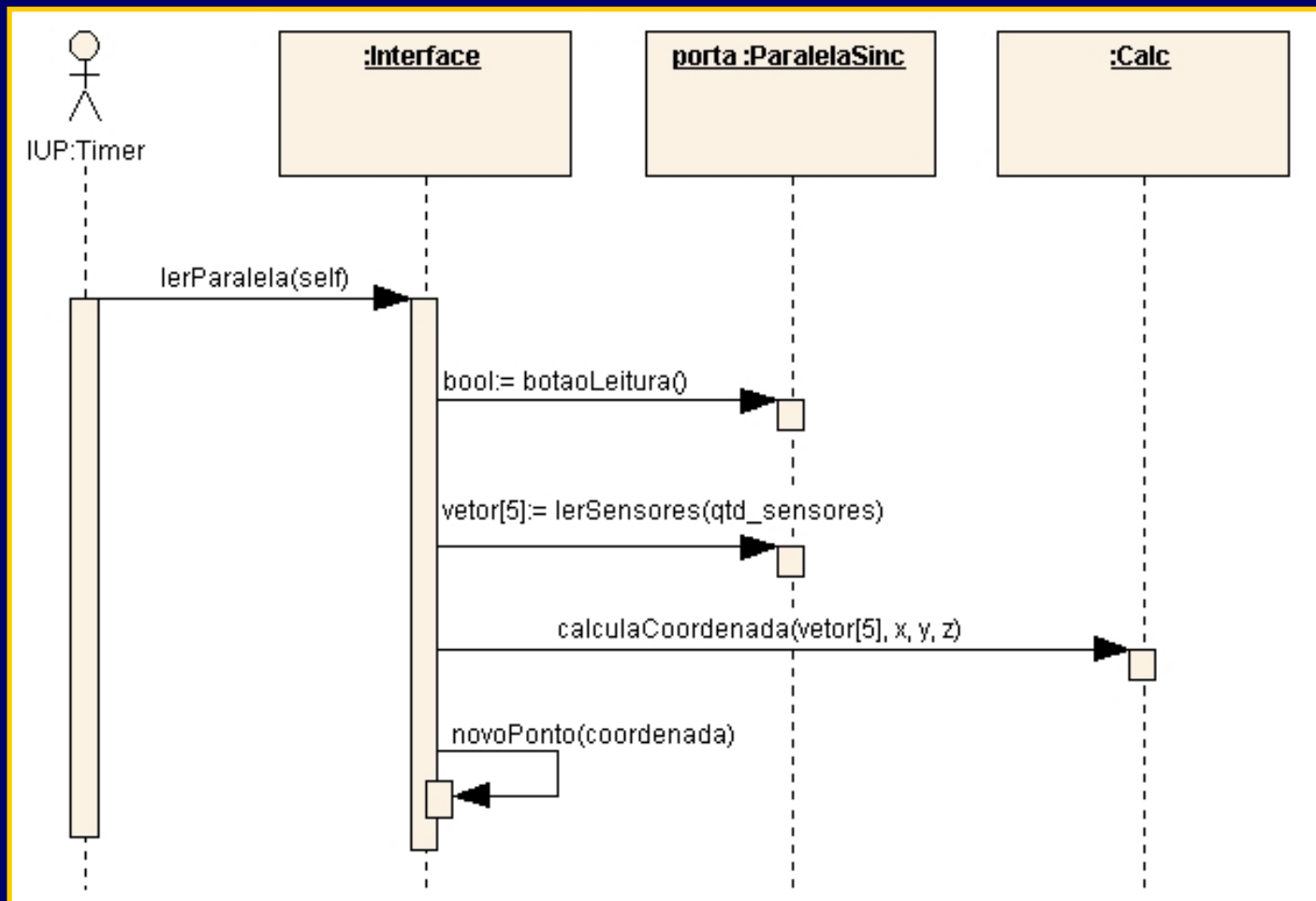


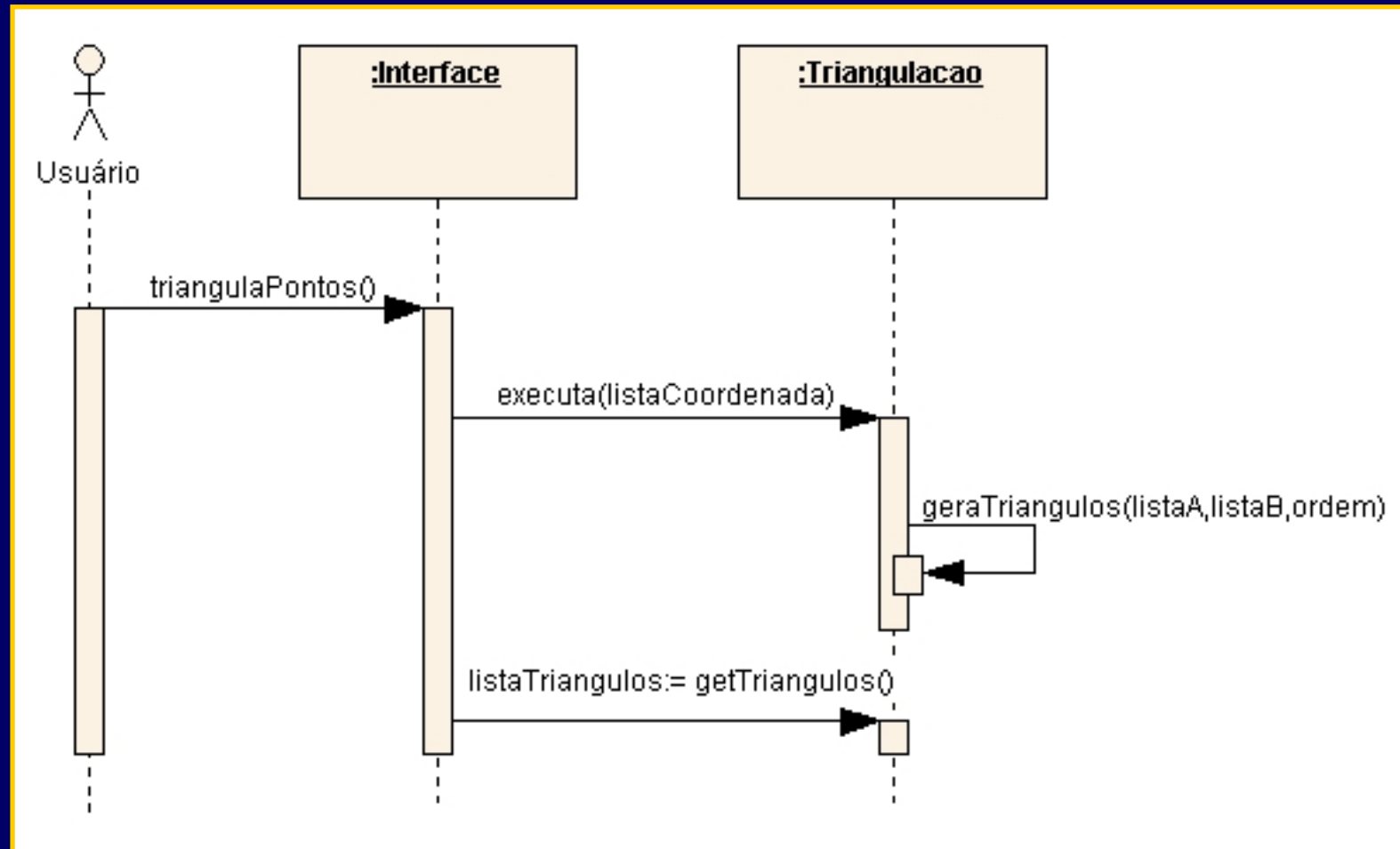
Diagrama de classes

Especificação do *software*



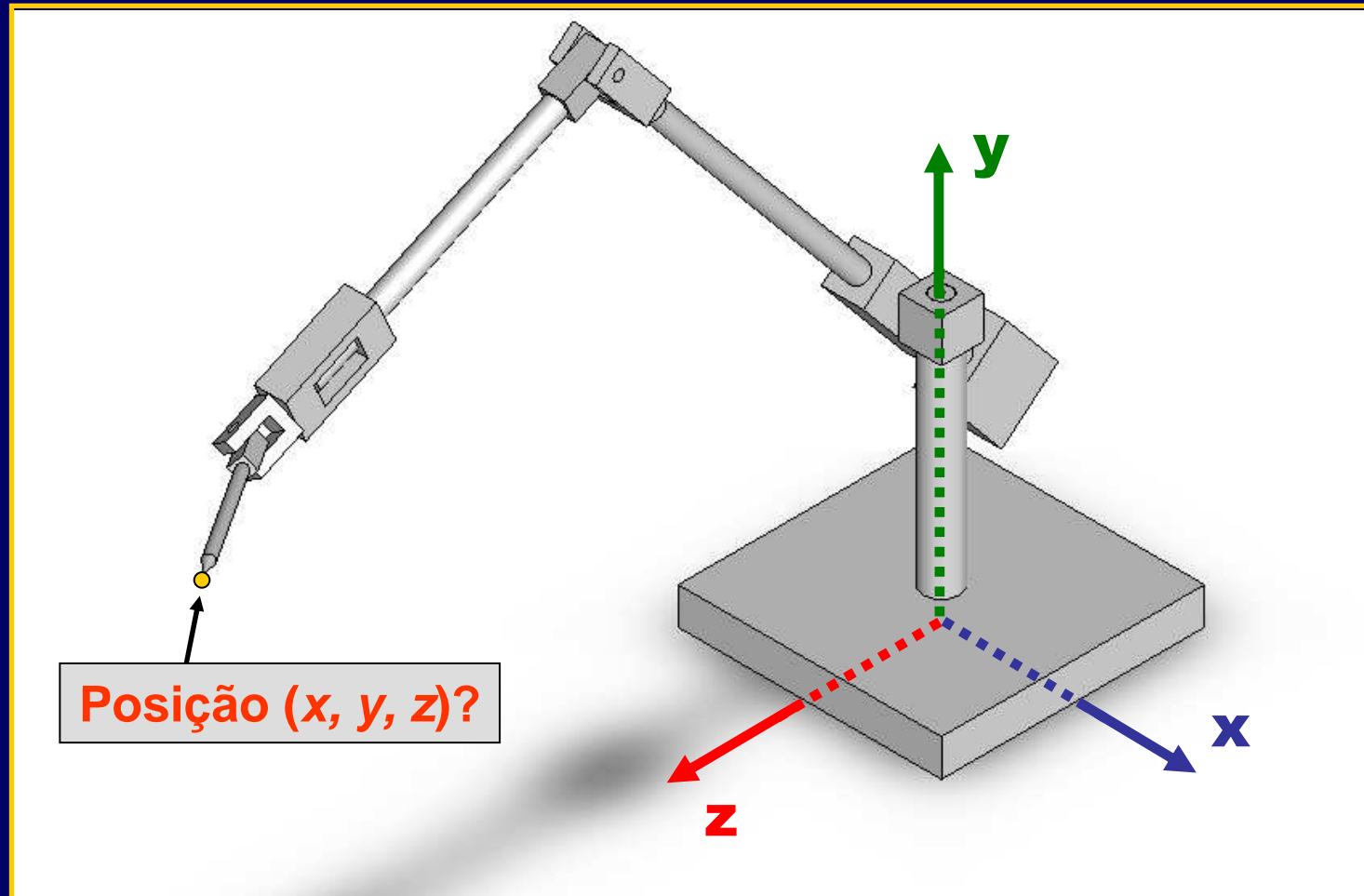
Captura de coordenadas

Especificação do *software*

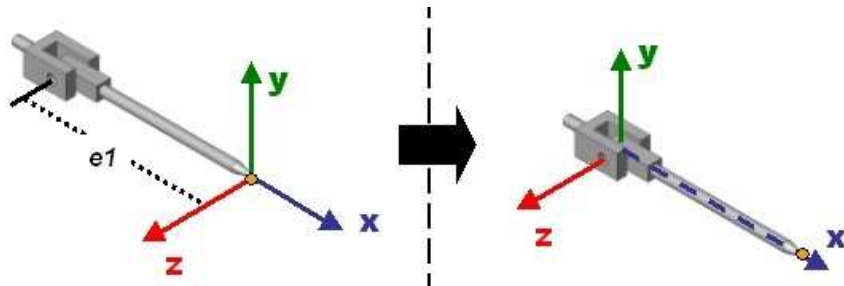


Triangulação dos pontos

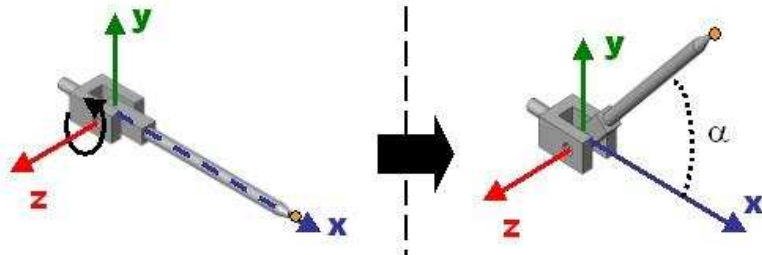
Cálculo da coordenada



Composição de matrizes



$$[T_1] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & e_1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

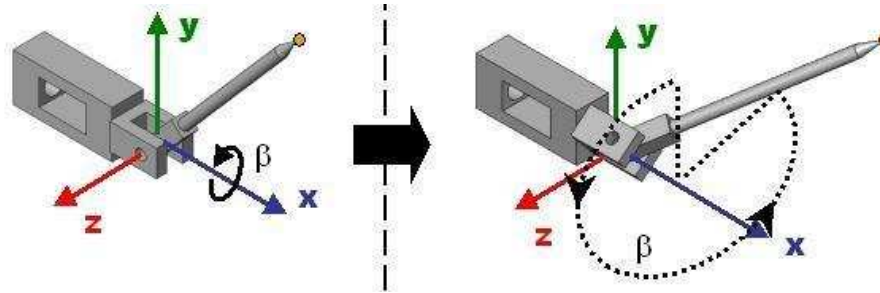


$$[T_{21}] = [T_2] \cdot [T_1]$$

$$[T_{21}] = \begin{bmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha & 0 & 0 \\ \sin \alpha & \cos \alpha & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & e_1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$[T_{21}] = \begin{bmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha & 0 & \cos \alpha \cdot e_1 \\ \sin \alpha & \cos \alpha & 0 & \sin \alpha \cdot e_1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Composição de matrizes

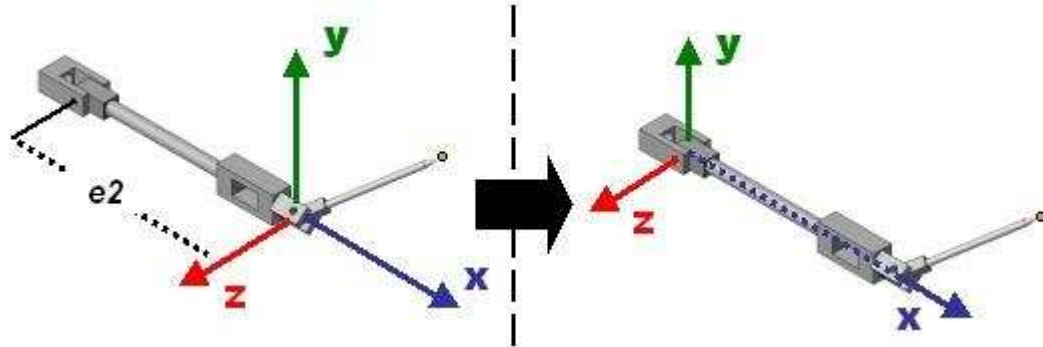


$$[T_{321}] = [T_3] \cdot [T_{21}]$$

$$[T_{321}] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \beta & -\sin \beta & 0 \\ 0 & \sin \beta & \cos \beta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha & 0 & \cos \alpha \cdot e1 \\ \sin \alpha & \cos \alpha & 0 & \sin \alpha \cdot e1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

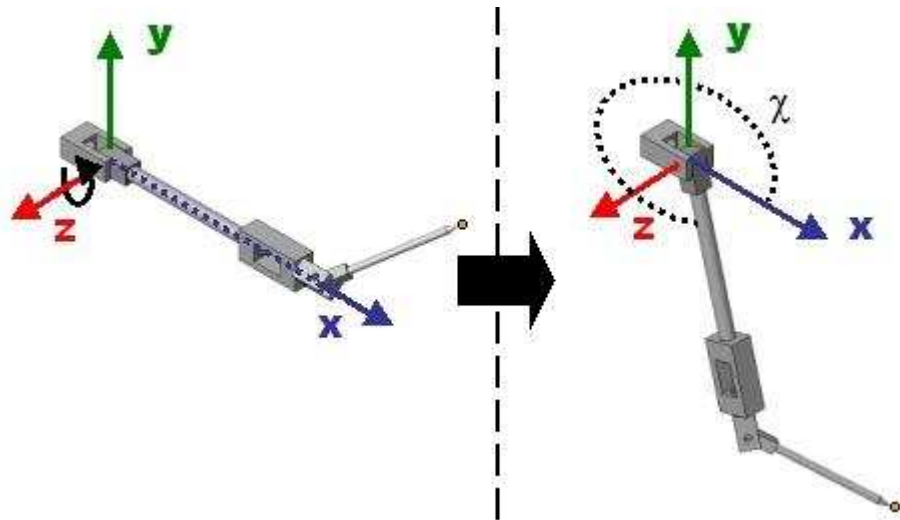
$$[T_{321}] = \begin{bmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha & 0 & \cos \alpha \cdot e1 \\ \sin \alpha \cdot \cos \beta & \cos \alpha \cdot \cos \beta & -\sin \beta & \sin \alpha \cdot e1 \cdot \cos \beta \\ \sin \alpha \cdot \sin \beta & \cos \alpha \cdot \sin \beta & \cos \beta & \sin \alpha \cdot e1 \cdot \sin \beta \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Composição de matrizes



$$[T_4] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & e2 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

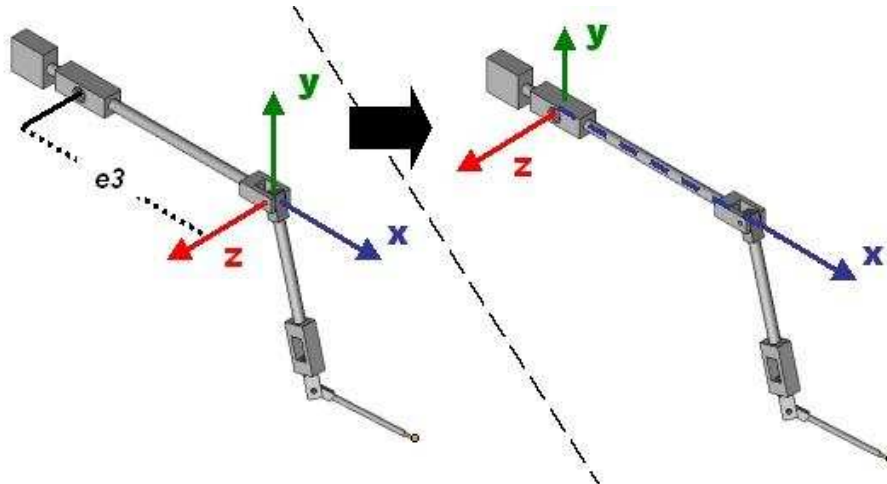
$$[T_{4321}] = [T_4] \cdot [T_{321}]$$



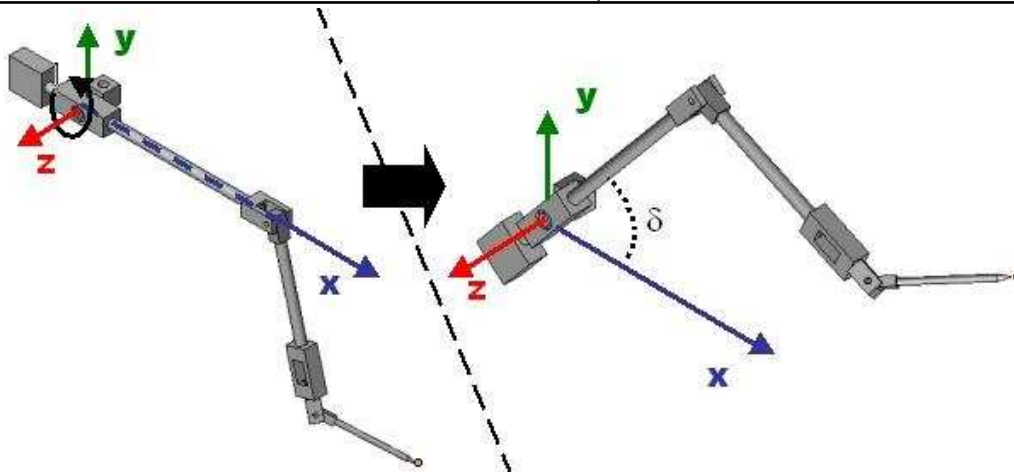
$$[T_5] = \begin{bmatrix} \cos \chi & -\text{sen } \chi & 0 & 0 \\ \text{sen } \chi & \cos \chi & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$[T_{54321}] = [T_5] \cdot [T_{4321}]$$

Composição de matrizes

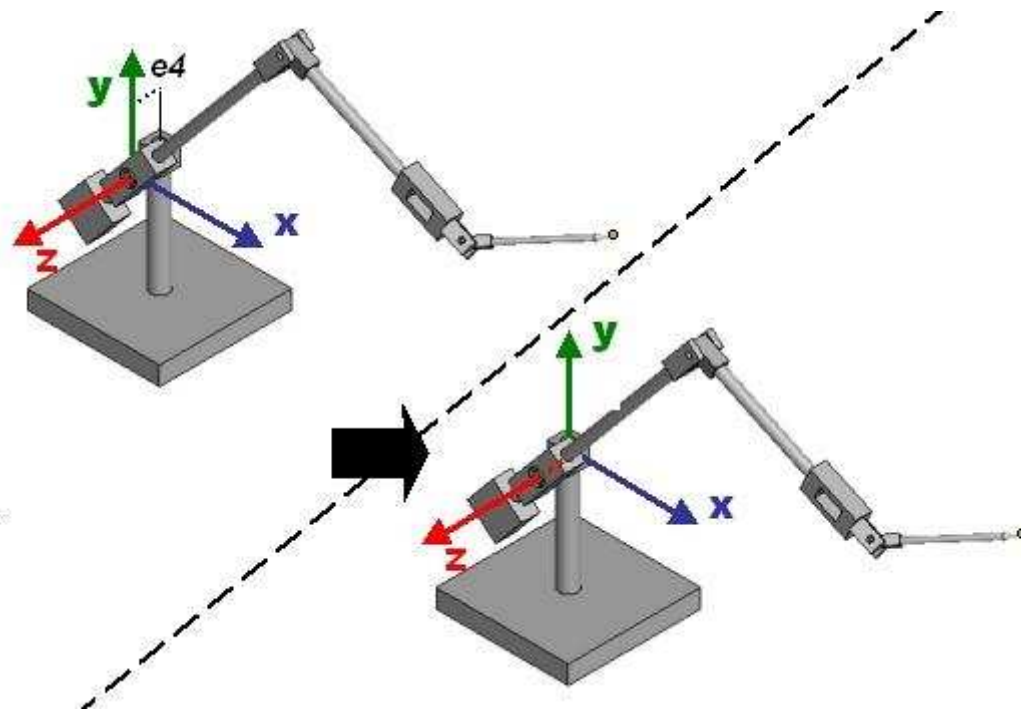


$$[T_6] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & e3 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$
$$[T_{654321}] = [T_6] \cdot [T_{54321}]$$



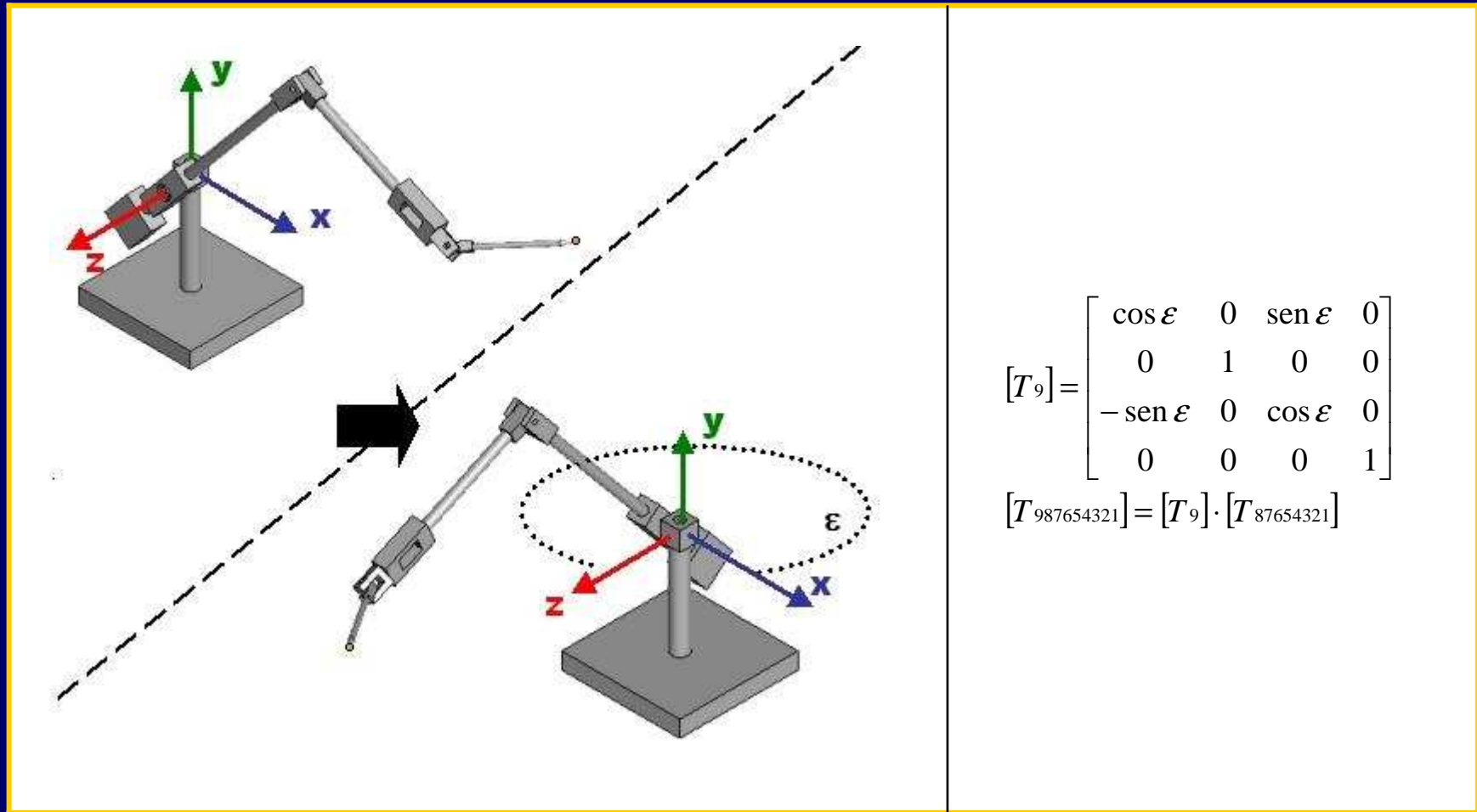
$$[T_7] = \begin{bmatrix} \cos \delta & -\text{sen } \delta & 0 & 0 \\ \text{sen } \delta & \cos \delta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$
$$[T_{7654321}] = [T_7] \cdot [T_{654321}]$$

Composição de matrizes

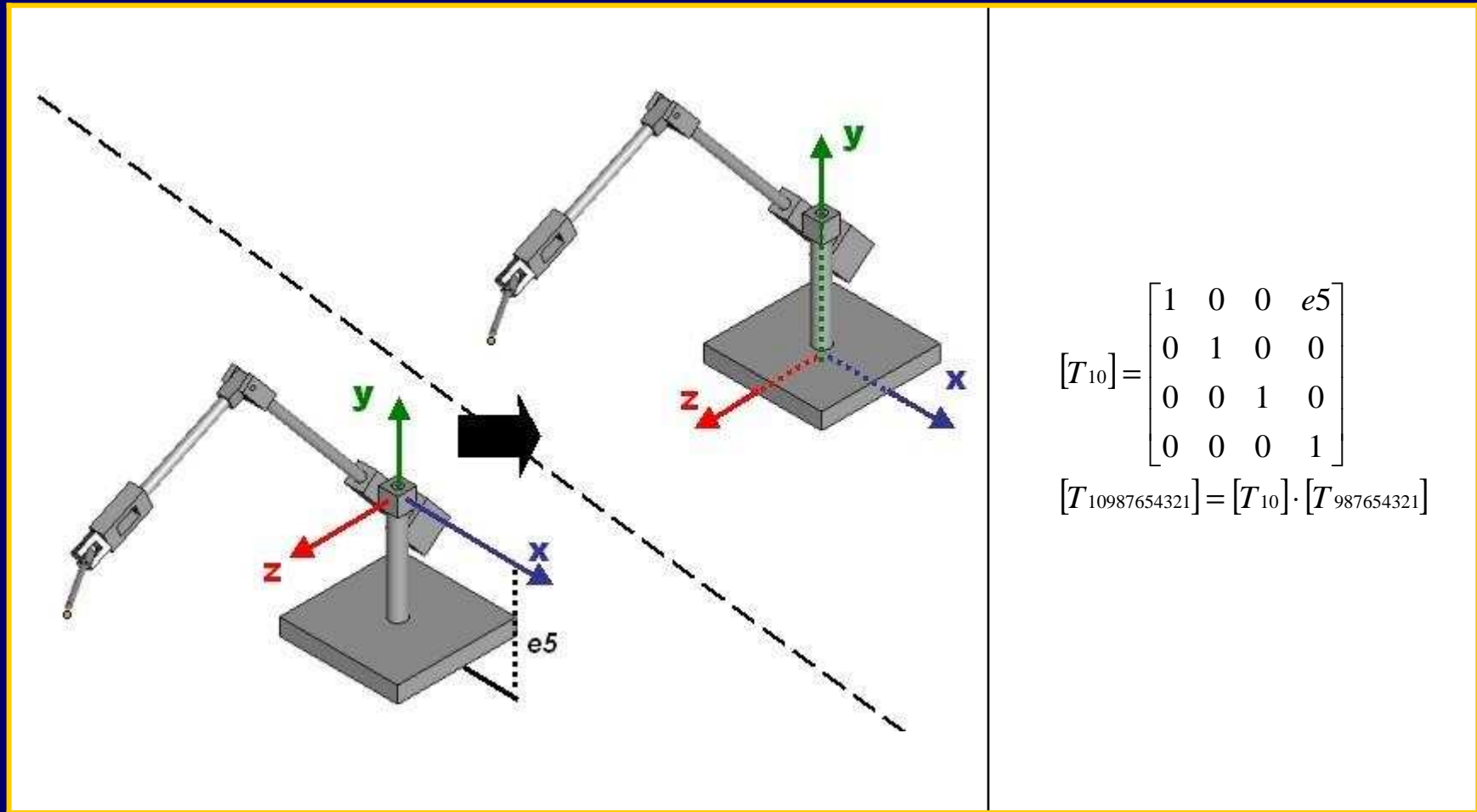


$$[T_8] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & e4 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$
$$[T_{87654321}] = [T_8] \cdot [T_{7654321}]$$

Composição de matrizes



Composição de matrizes



Composição de matrizes

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} = [T_{10987654321}] \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$x = \cos \varepsilon \cdot (\cos \delta \cdot ((\cos \chi \cdot (\cos \alpha \cdot e1 + e2) - \sin \chi \cdot \cos \beta \cdot \sin \alpha \cdot e1) + e3) - \sin \delta \cdot (\sin \chi \cdot (\cos \alpha \cdot e1 + e2) + \cos \chi \cdot \cos \beta \cdot \sin \alpha \cdot e1)) + \sin \varepsilon \cdot (\sin \beta \cdot \sin \alpha \cdot e1 + e4)$$

$$y = (\sin \delta \cdot ((\cos \chi \cdot (\cos \alpha \cdot e1 + e2) - \sin \chi \cdot \cos \beta \cdot \sin \alpha \cdot e1) + e3) + \cos \delta \cdot (\sin \chi \cdot (\cos \alpha \cdot e1 + e2) + \cos \chi \cdot \cos \beta \cdot \sin \alpha \cdot e1)) + e5$$

$$z = -\sin \varepsilon \cdot (\cos \delta \cdot ((\cos \chi \cdot (\cos \alpha \cdot e1 + e2) - \sin \chi \cdot \cos \beta \cdot \sin \alpha \cdot e1) + e3) - \sin \delta \cdot (\sin \chi \cdot (\cos \alpha \cdot e1 + e2) + \cos \chi \cdot \cos \beta \cdot \sin \alpha \cdot e1)) + \cos \varepsilon \cdot (\sin \beta \cdot \sin \alpha \cdot e1 + e4)$$

Reconstrução de superfícies

- Impossibilidade de implementação das técnicas existentes devido a imprecisão na captura de coordenadas
- Técnicas complexas exigindo estudos por mais tempo que o tempo disponível
- Nova técnica proposta

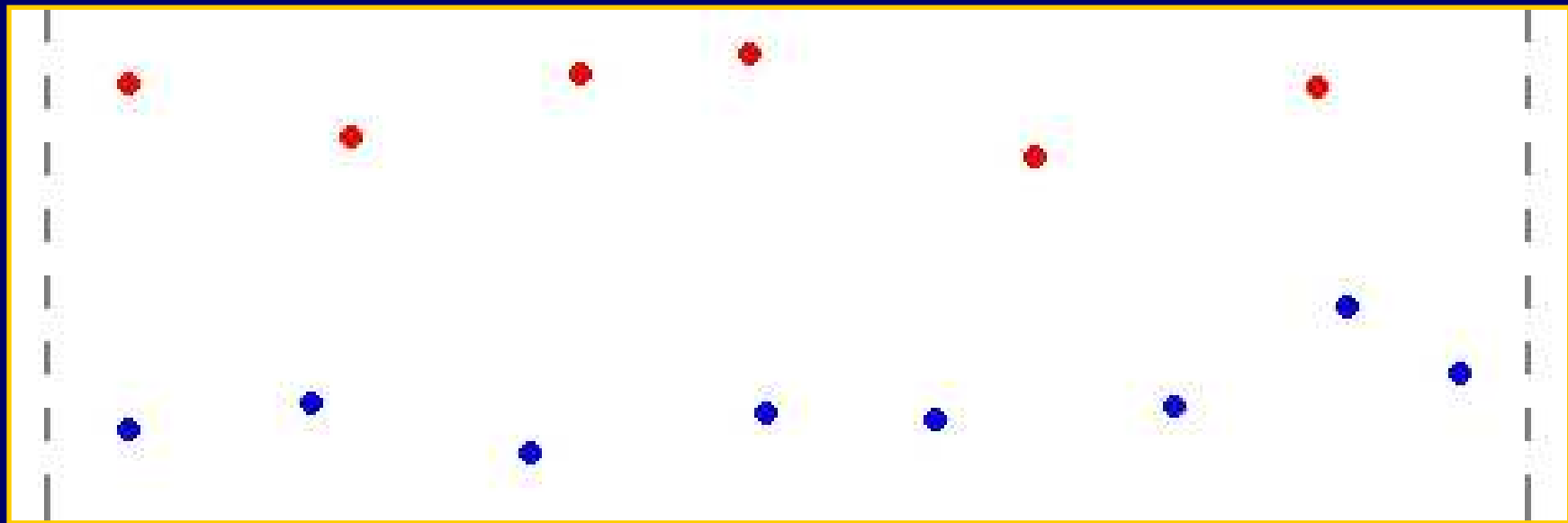
Técnica proposta

- Captura de pontos realizada em seqüência e dividindo-os em camadas (formando anéis)
- A cada duas camadas se efetua a triangulação
- Restrita a alguns objetos



Técnica proposta

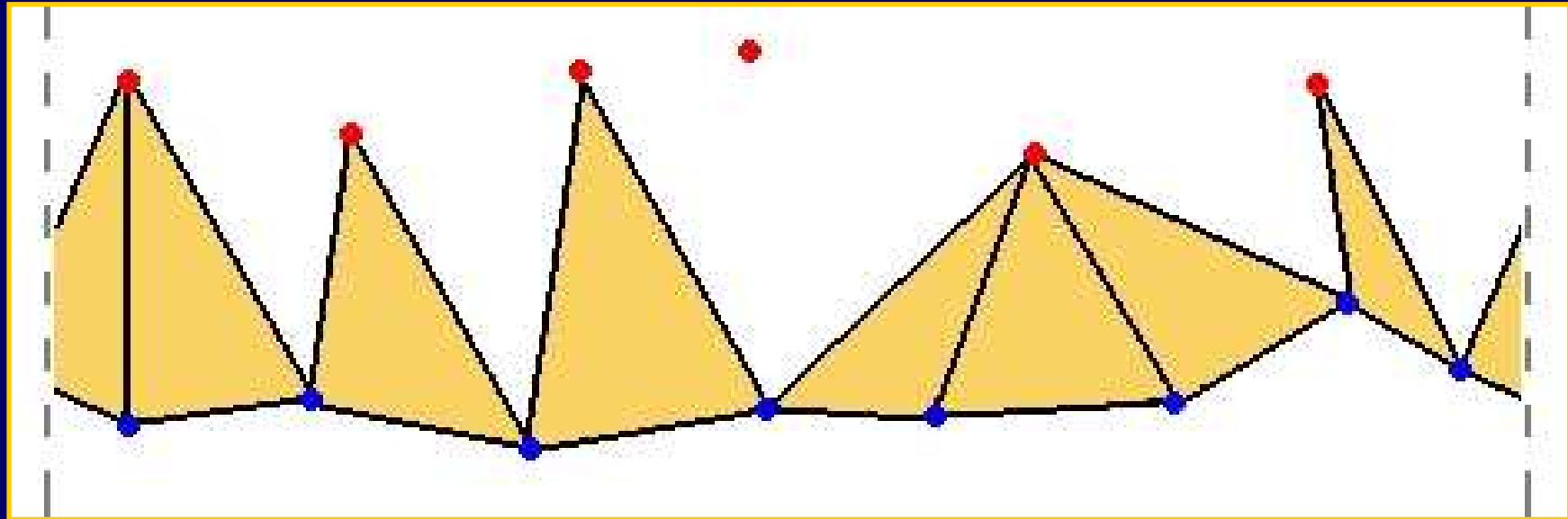
A cada duas camadas vizinhas são realizados os passos a seguir:



Entrada de dados: duas camadas vizinhas

■ Camada A
■ Camada B

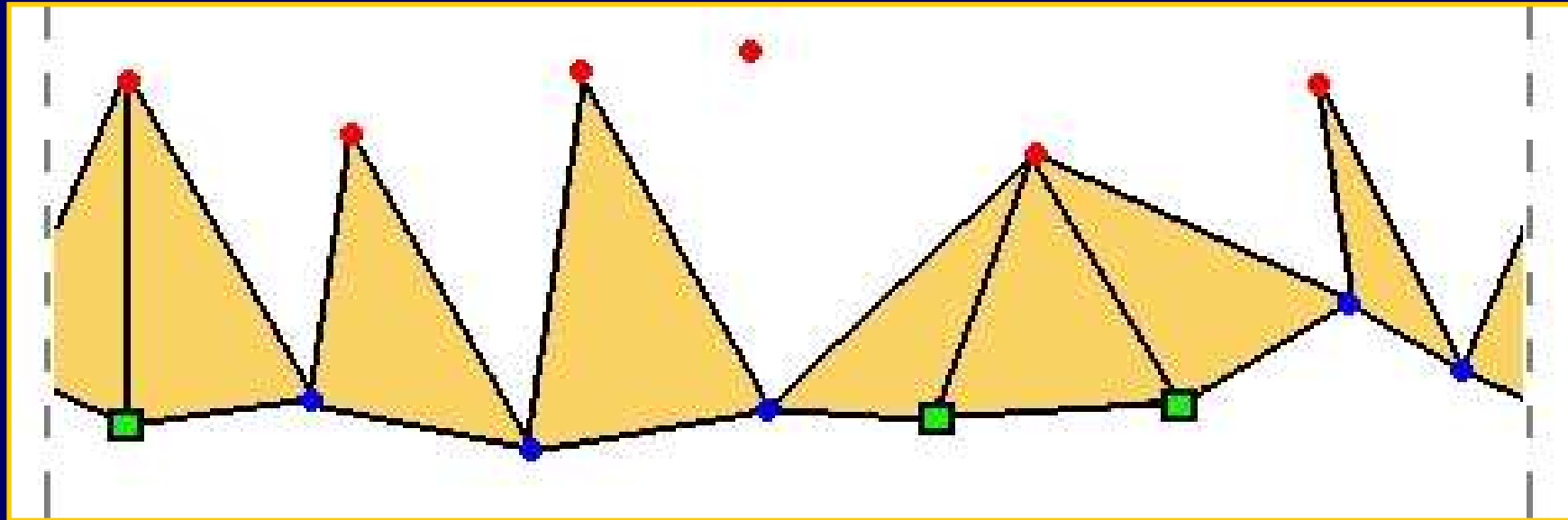
Técnica proposta



1º passo: percorrer a camada A e formar triângulos com pontos da camada B.

■ Camada A
■ Camada B

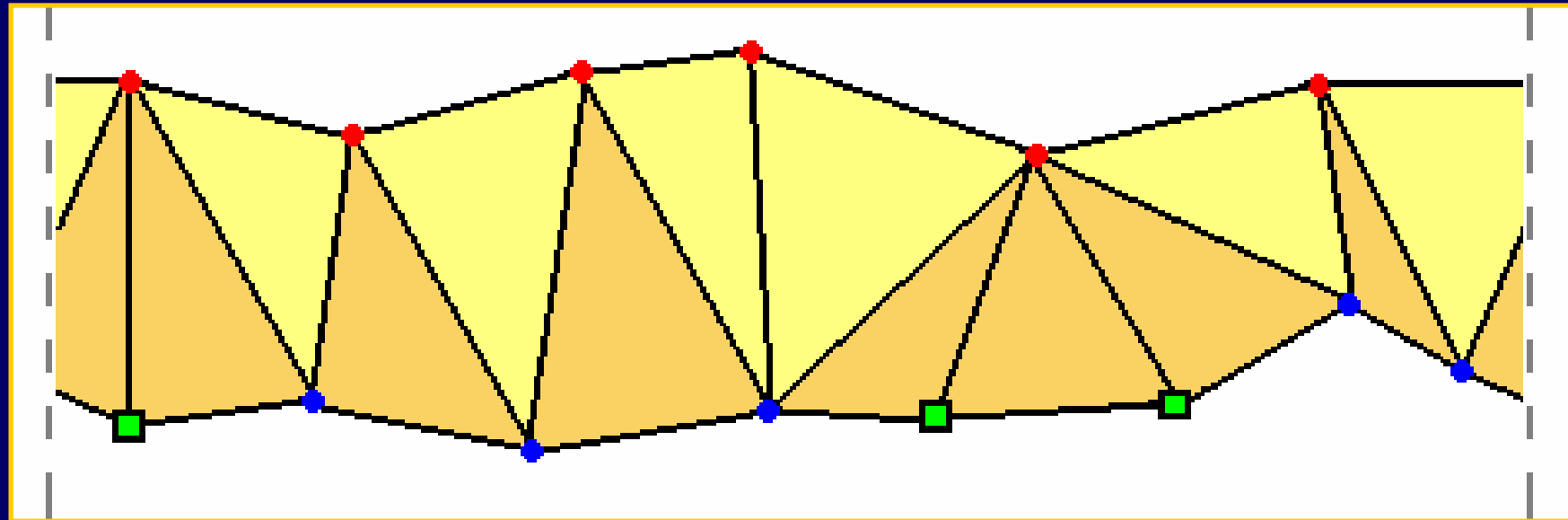
Técnica proposta





2º percorrer a camada A, descartando os pontos isolados. Para cada ponto encontrado buscar os dois triângulos, para chegar aos pontos da camada B

- Camada A
- Camada B
- Pontos isolados

Técnica proposta



Resultado ao fim do processo de
da triangulação de uma camada

-  Triângulos 1º passo
-  Triângulos 2º passo

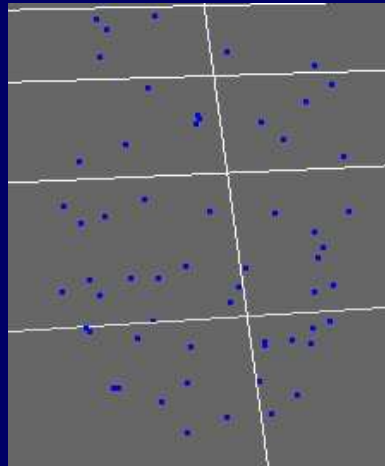
Operacionalidade

- Manuseio do *hardware*:
 - O braço digitalizador deve estar conectado ao computador, e a fonte de alimentação
 - Para capturar coordenadas basta encostar a ponta sensora na superfície do objeto, um *beep* soará indicando a leitura
 - Capturar as coordenadas seqüencialmente
 - Para início de uma nova camada deve-se segurar a ponta sensora pressionada contra o objeto por um tempo de aproximadamente 3 segundos, e soará um segundo *beep*

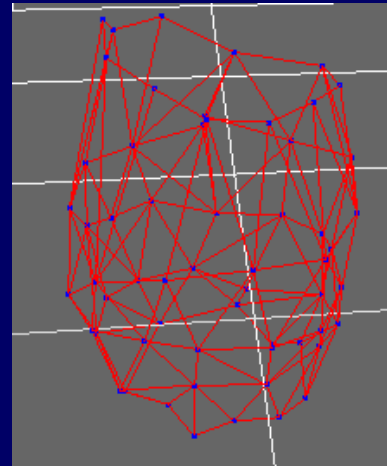
Resultados



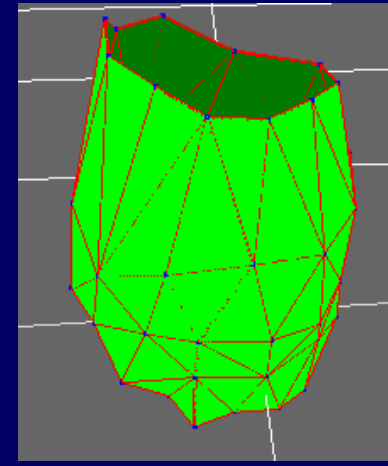
Objeto real



Pontos capturados



Reconstruído com linhas



Reconstruído com triângulos

Resultados

| COMPARATIVO ENTRE COORDENADAS REAIS E COORDENADAS LIDAS | | | |
|--|------------------------|--------------------------|-------------------------|
| Coordenada real (mm) | Coordenada lida (mm) | Erro (em módulo) | Erro percentual |
| (150 150 0) | (157,55 -176,63 0,55) | (7,55 26,63 0,55) | (0,72 2,55 0,05) |
| (250 150 0) | (252,24 -159,97 4,13) | (2,24 9,97 4,13) | (0,21 0,95 0,4) |
| (350 150 0) | (357,70 -159,66 -7,54) | (7,7 9,66 7,54) | (0,74 0,92 0,72) |
| (450 150 0) | (459,62 -158,35 -1,39) | (9,62 8,35 1,39) | (0,92 0,8 0,13) |
| (150 0 0) | (165,10 -11,54 6,16) | (15,1 11,54 6,16) | (1,44 1,1 0,59) |
| (250 0 0) | (258,79 -9,81 9,22) | (8,79 9,81 9,22) | (0,84 0,94 0,88) |
| (350 0 0) | (363,6 -5,45 2,40) | (13,6 5,45 2,4) | (1,3 0,52 0,23) |
| (450 0 0) | (458,48 2,88 8,12) | (8,48 2,88 8,12) | (0,81 0,28 0,78) |
| (150 -150 0) | (167,24 143,28 10,64) | (17,24 6,72 10,64) | (1,65 0,64 1,02) |
| (250 -150 0) | (265,46 141,55 11,10) | (15,46 8,45 11,1) | (1,48 0,81 1,06) |
| (350 -150 0) | (357,53 140,03 13,13) | (7,53 9,97 13,13) | (0,72 0,95 1,26) |
| (450 -150 0) | (466,92 147,92 23,94) | (16,92 2,08 23,94) | (1,62 0,2 2,29) |
| Erro médio | | (10,85 9,29 8,19) | (1,03 0,89 0,78) |

Avaliação da captura de coordenadas

Conclusões

- Boa mobilidade para captura dos pontos
- Simples manuseio
- Apresenta erro já esperado na captura das coordenadas
- Método de reconstrução proposto, obteve resultados satisfatórios

Extensões

- Melhoria do hardware
- Reestruturar a parte de comunicação, tornando todo o trabalho portátil
- Desenvolver algum método de triangulação para digitalizar objetos sem restrição quanto à sua topologia