

Projeto e Desenvolvimento de um Digitalizador Tridimensional de Baixo Custo

MAURÍCIO RAFAEL MAURER¹
RODRIGO OCTÁVIO DE OLIVEIRA MELLO¹
HÉLIO PEDRINI¹

Universidade Federal do Paraná - UFPR
Departamento de Informática
Centro Politécnico - Jardim das Américas
Curitiba-PR, Brasil, 81531-990
¹(mrafael,oliveira,helio)@inf.ufpr.br

Resumo. A redução do custo dos recursos computacionais e a introdução de novas técnicas de modelagem e visualização vêm tornando a digitalização tridimensional mais acessível entre engenheiros, projetistas de jogos eletrônicos, artistas gráficos e cientistas. Em contrapartida, inúmeros digitalizadores a laser são empregados atualmente em projetos que demandam uma alta qualidade na digitalização de modelos reais tridimensionais. Esses digitalizadores são, em geral, de alto custo e de emprego dedicado, visto que os modelos digitalizados possuem um grande número de vértices, dificultando sua manipulação pelo usuário pouco especializado. Visando propor um dispositivo de baixo custo e com precisão relativamente alta, este trabalho apresenta o projeto de um digitalizador tridimensional para uso doméstico ou profissional. A discussão abrange os detalhes mais relevantes dos projetos mecânico, eletrônico e de software, bem como os resultados de testes realizados com um protótipo funcional. O trabalho mostra que o desenvolvimento de um digitalizador de baixo custo é factível e, mesmo com a utilização de um projeto mecânico simples, o equipamento apresenta uma relação precisão/custo relativamente alta.

Palavras-Chave: Digitalização Tridimensional, Cinemática, Protótipo de Digitalizador.

Project and Development of a Low-Cost Three-dimensional Digitizer

Abstract. The cost reduction in computational resources and the introduction of new modeling and visualization techniques have become three-dimensional digitization more accessible among engineers, video game developers, designers and scientists. On the other hand, several laser scanners are currently employed in projects that demand a high quality digitization of three-dimensional models. Such scanners are, in general, very specialized and expensive, since that the scanned models have a large number of vertices, making their use by novice users a complex task. This paper presents the project of a low cost and relatively high precision 3D digitizer for domestic or professional use. The discussion includes the most relevant aspects of mechanical, electronic and software design, and the test results obtained from a working prototype. The work demonstrates that the development of a low cost digitizer is feasible and, despite its simple mechanical design, the device possesses a relatively high precision/cost ratio.

Keywords: Three-dimensional Digitization, Kinematics, Digitizer Prototype.

(Received November 22, 2006 / Accepted June 19, 2007)

1 Introdução

Embora a modelagem de objetos tridimensionais (3D) seja uma atividade complexa, particularmente quando o número de detalhes é alto, várias aplicações demandam a geração de modelos geométricos ou réplicas a partir das características das superfícies externas de objetos. A digitalização tridimensional consiste na reconstrução de um objeto real, possibilitando a manipulação do modelo geométrico no computador. Essa tarefa é realizada por equipamentos conhecidos por digitalizadores ou *scanners* 3D.

A redução do custo dos recursos computacionais e a introdução de novas técnicas de modelagem e visualização vêm tornando a digitalização tridimensional mais acessível a diversas áreas. Este trabalho descreve o projeto e desenvolvimento de um dispositivo para permitir a digitalização de modelos tridimensionais reais de forma simples, rápida e a um custo baixo, particularmente úteis na criação de ambientes virtuais.

Os principais requisitos considerados na realização do projeto incluem a facilidade de operação, simplicidade do projeto, custo e precisão. A redução nos custos e no tempo para fabricação do protótipo viabilizaram o desenvolvimento do digitalizador, uma vez que esses recursos eram bastante limitados. A precisão do digitalizador foi estabelecida em 3 mm, possibilitando que detalhes com no mínimo essa precisão pudessem ser capturados pelo dispositivo.

Quatro modelos de digitalizadores foram avaliados para atender aos requisitos estabelecidos, os dispositivos de *medição com laser*, *mesa digitalizadora*, *modelo marionete* e um *braço mecânico*.

A técnica de digitalização mais comum atualmente é a medição com laser [1, 3, 4, 6, 8]. Um emissor de raios laser percorre uma área retangular disposta paralelamente ao objeto, enquanto um foto-receptor mede o tempo de retorno do feixe emitido por esse emissor. As leituras dos pontos devem minimizar a perda de detalhes do objeto digitalizado. Embora seja a técnica mais precisa e difundida, os sensores empregados para medir a diferença de tempo entre a emissão do feixe de laser e o seu retorno são de alto custo. Além disso, essa leitura permite apenas que uma vista do objeto seja digitalizada a cada etapa do processo, dificultando a reconstrução completa do objeto tridimensional.

A segunda alternativa é uma mesa digitalizadora [9], normalmente utilizada por artistas gráficos em aplicações como retoques digitais, modelagem bidimensional ou animações. Com um ponteiro especial, similar a um *mouse* comum movendo-se sobre a mesa digitalizadora, é possível recuperar o deslocamento bidimensional do ponteiro quando o aparelho é acionado sobre ela. Estas

mesas têm precisão semelhante a um *mouse* com esfera e são facilmente encontradas no mercado. Seu custo varia de algumas centenas a alguns milhares de dólares, quando para uso cartográfico ou aplicações mais específicas. Informando ao programa de controle a altura e formato da haste utilizada para realizar a medição, basta somar esses deslocamentos à posição bidimensional adquirida com a mesa digitalizadora e obter, no cálculo final, a posição do ponto indicado pela haste.

A terceira alternativa avaliada consiste em um mecanismo que efetua três medições espaciais ao longo de três vetores [7]. Três carretéis de linha não deformável, acoplados a medidores angulares, dispostos de maneira a formar uma base, fornecem a distância do ponto medido a cada um dos carretéis. As três linhas são utilizadas sempre em conjunto, medindo o mesmo ponto no espaço. Esse projeto é baseado em um conceito simples, em que a distância medida em cada carretel corresponde ao raio de uma esfera com centro neste mesmo carretel e o ponto medido é a intersecção da superfície das três esferas.

A quarta alternativa analisada foi um braço mecânico [5, 7] com quatro graus de liberdade. As articulações são conectadas por segmentos. As coordenadas da extremidade do braço podem ser determinadas conhecendo-se o ângulo de cada articulação e os deslocamentos ou o comprimento de cada segmento, que são as hastes que conectam as articulações. Como os segmentos têm tamanho fixo, basta medir os ângulos descritos pelas articulações em um dado momento.

A seção 2 descreve a implementação da articulação empregada no protótipo do digitalizador tridimensional, que é parte essencial do projeto mecânico. A seção 3 descreve as principais características do projeto eletrônico. A seção 4 apresenta os detalhes da implementação do programa de controle do circuito digital. Os resultados experimentais são mostrados na seção 5. As conclusões e considerações finais deste trabalho são apresentadas na seção 6.

2 Projeto Mecânico

A figura 1 mostra um diagrama do conjunto do projeto mecânico do digitalizador. Uma parte essencial do projeto mecânico é a articulação. Para que a precisão e a simplicidade de projeto sejam atendidas, o projeto da articulação mecânica é um desafio. A usinagem das peças deve ser simples para que o custo do projeto não seja demasiado alto e o movimento de rotação de uma peça, posicionada do outro lado da articulação, deve ser transmitido à parte móvel do medidor angular sem que existam folgas, como mostra a figura 2. A medição dos ângulos das articulações é feita com *encoders*, que

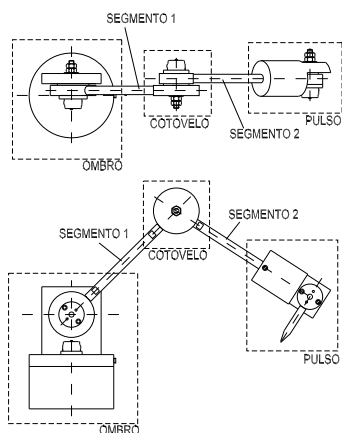


Figura 1: Módulos do digitalizador tridimensional.

são sensores projetados especificamente para realizar a transformação de ângulos em sinais digitais.

O *encoder*, acoplado à peça B na figura 2, mede a diferença angular geralmente entre um eixo e uma peça, sendo uma delas fixa. Na figura 2, o eixo faz parte da peça A e transmite o movimento à parte móvel do *encoder* fixado no lado oposto da peça B. Quando a articulação se move, o eixo gira a parte móvel do *encoder* e o ângulo entre a parte móvel e a fixa pode ser medido.

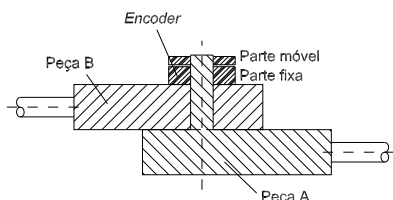


Figura 2: Funcionamento esquemático do *encoder* e a articulação.

Na articulação do Pulso, mostrado na figura 3, a extremidade do segmento 2 faz o papel do pino das articulações, que serve de eixo nas articulações do ombro e cotovelo. Para garantir o movimento de rotação do conjunto, minimizar a interferência entre o mancal e o segmento e reduzir a trepidação, são instalados dois rolamentos separados por um anel de alumínio de 3 mm de comprimento. Esse espaçamento entre os rolamentos visa reduzir a folga transversal do conjunto em relação ao segmento. Um pino funciona como apoio do rolamento mais interno e da mola, que empurra o encosto no sentido oposto ao rolamento mais externo. O encosto está aparafusado no mancal, cujo movimento é barrado pelo rolamento externo. Assim, a folga longitudinal do conjunto é praticamente eliminada.

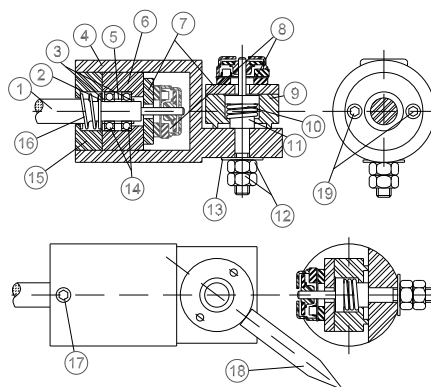


Figura 3: Diagrama das peças do Pulso. (1) segmento 2; (2) arruela diâmetro 8 x 15 mm; (3) pino do rolamento (1 x 10 mm); (4) suporte transmissor; (5) anel do rolamento (3x8x9mm); (6) mancal; (7) suporte do *encoder*; (8) *encoder*; (9) flange; (10) mola; (11) pino; (12) porca M6 x 6 mm; (13) arruela diâmetro 6 x 20 mm; (14) rolamento 8 x 16 x 4 mm; (15) encosto; (16) mola; (17) parafuso allen M3 x 8 mm; (18) dedo; (19) parafuso allen M3 x 14 mm.

Um suporte de *encoder* é fixado na parte frontal do mancal. Na extremidade do suporte transmissor, há a quinta articulação, similar às outras mas com o tamanho reduzido. Fixada a essa articulação, localiza-se o Dedo, que indica o ponto a ser digitalizado. A figura 4 mostra imagens do protótipo funcional construído com base nos projetos mecânico e eletrônico.

3 Projeto Eletrônico

Como complemento ao projeto mecânico, o projeto eletrônico tem como função traduzir os pulsos elétricos dos *encoders* acoplados ao braço mecânico e transmiti-los via porta paralela ao computador com o software de controle instalado. Embora o projeto tenha utilizado a interface paralela, outras possibilidades como USB ou IEEE 1394, por exemplo, poderiam ser adotadas.

Para realizar a medição do ângulo das articulações foram empregados *encoders* de reflexão luminosa. Esse modelo de *encoder* realiza a leitura pela reflexão da luz e não pela interrupção do feixe, como é o caso dos leitores de *mouse*. Pelo tamanho reduzido do dispositivo e seu baixo custo, ele produz 300 pulsos por revolução. Essa característica não é a ideal para a medição dos ângulos do digitalizador, pois a precisão alcançada é de apenas 1,2 graus.

A solução adotada é o emprego de um circuito integrado (LS7084), que multiplica a resolução do *encoder* por quatro, possibilitando a leitura de 1200 pulsos por revolução. Além dessa funcionalidade, o circuito é uma interface entre o *encoder* e um contador comum, como por exemplo o circuito integrado 74HC191. As

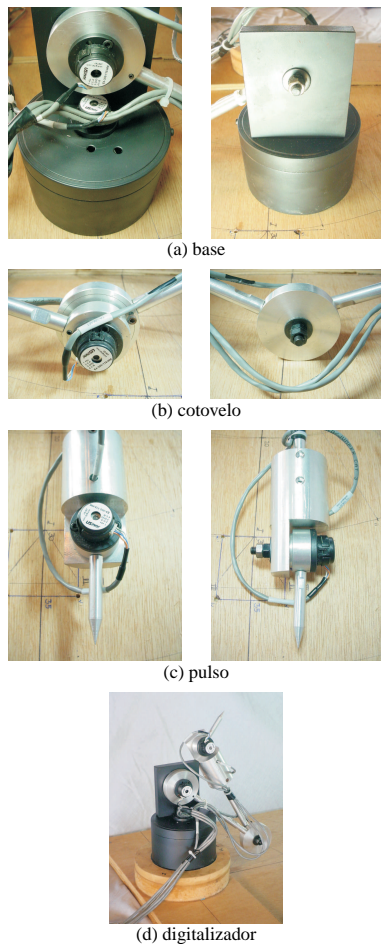


Figura 4: Imagens do digitalizador tridimensional.

saídas do circuito integrado LS7084, que fazem a interface com o contador 74HC191, são conectadas de maneira a adicionar ou subtrair 1 do contador. A partir do estado dos dois canais emitidos pelo *encoder*, o LS7084 determina o sentido da rotação e aciona o contador apropriadamente.

Como a resolução do *encoder* é multiplicada por quatro, resultando em 1200 pulsos por revolução, é necessário um contador com no mínimo 11 bits ($2^{11} = 2048$) para que nenhum pulso seja perdido durante a operação do braço. Não existem, porém, contadores com esse número de bits de saída. Para tanto, três contadores de 4 bits são ligados utilizando o *clock* de maneira síncrona, totalizando 12 bits disponibilizados para a contagem dos pulsos de cada *encoder*.

Pode-se observar, a partir do diagrama mostrado na figura 5, que os dados recebidos do contador são primeiramente armazenados em um registrador, para então serem enviados ao computador via porta paralela.

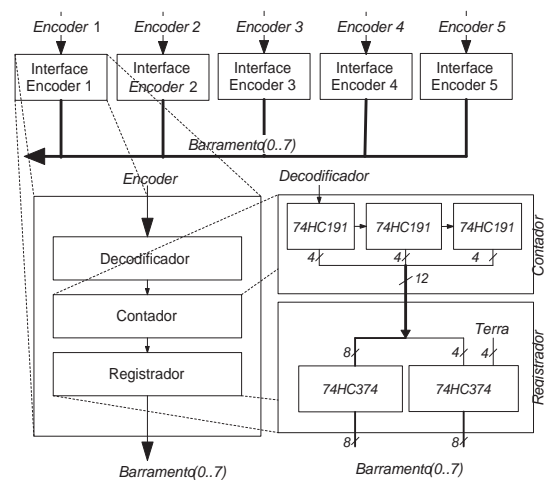


Figura 5: Diagrama da interface com os *encoders*.

Toda vez que o usuário solicita a digitalização de um determinado ponto, um pulso, fornecido pelo controle, é enviado ao registrador para que armazene os dados de saída do contador. Essa operação é necessária porque há um curto período entre a leitura do primeiro *encoder* e do último. Assim, se o operador do braço movimentá-lo durante a leitura dos dados, pode haver uma inconsistência na reconstrução do ponto indicado, já que no instante da última leitura, o braço poderia estar em outra posição, diferente de quando o usuário solicitou a leitura do dado.

O resultado dos contadores é então gravado em dois registradores de 8 bits cada um. Os 4 bits mais significativos, ligados a um dos registradores, são ligados ao terra, descartando-os assim que a leitura é realizada. Dessa forma, o resultado gravado nesses registradores contém no máximo 12 bits válidos e 16 no total. Todos os registradores de saída compartilham o mesmo barramento de dados até o computador. Apenas uma linha de dados com 60 bits (12 bits para cada grupo de contadores e 5 grupos) não é viável. Ainda que isto fosse possível, há um gargalo de 8 bits para a comunicação com o computador através da porta paralela, ou seja, os dados de saída devem ser multiplexados. Circuitos integrados 74HC374 são utilizados, ou seja, registradores do tipo D que possuem saída *tri-state* para que o barramento de dados possa ser compartilhado.

3.1 Transferência dos Dados

Os dados não podem ser enviados à porta paralela diretamente através do barramento de dados. Para que a leitura dos dados pelo computador seja possível, os bits devem ser transmitidos indiretamente. A figura 6 mos-

tra como essa transferência é implementada no circuito.

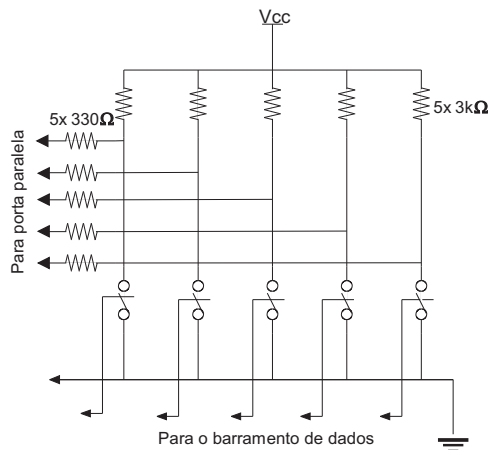


Figura 6: Circuito para leitura dos dados pela porta paralela.

Chaves lógicas acionadas pelos dados contidos nos registradores de saída estão ligadas à alimentação e ao terra. Quando recebem 0 no controle, as chaves lógicas estão abertas e a porta paralela lê um nível alto. Caso as chaves recebam o nível 1 em seu controle, elas fecham, transmitindo um nível baixo à interface.

3.2 Controle

O controle do circuito é responsável pela seleção das saídas ativas a cada momento, a reinicialização de cada um dos grupos de contadores e a ativação dos registradores de saída. As saídas dos 5 grupos de registradores são compartilhadas em um mesmo barramento de 8 bits.

A tabela 1 relaciona os controles implementados no circuito e suas funções. A função de armazenamento de dados é síncrona, ou seja, no momento de sua ativação este sinal funciona como um pulso de *clock* para todos os registradores de saída, armazenando os dados dos respectivos grupos de contadores. A importância de que todos os registradores tenham suas entradas de *clock* sincronizadas dá-se pelo fato de que pode haver uma inconsistência nos dados dos contadores: o braço é extremamente sensível e a menor vibração pode alterar a medida dos ângulos durante a leitura dos valores de cada *encoder*.

O *reset* dos contadores ocorre de maneira assíncrona para o circuito e síncrona dentro de cada um dos grupos de contadores. A função de *reset* é utilizada para a calibração do braço e, por isso, cada um dos grupos de contadores deve ser reiniciado separadamente. Quando ativada, esta função leva a zero todos os bits do respectivo grupo de contadores. Isto é realizado ativando-se a opção de carregamento de dados dos contadores. Suas

Tabela 1: Códigos de controle.

Controle	Função
Controle 0	Armazena dados nos registradores de saída
Controle 1	<i>Reset</i> do grupo de contadores 0
Controle 2	<i>Reset</i> do grupo de contadores 1
Controle 3	<i>Reset</i> do grupo de contadores 2
Controle 4	<i>Reset</i> do grupo de contadores 3
Controle 5	<i>Reset</i> do grupo de contadores 4
Controle 6	Habilita saída <i>LSB</i> do grupo de contadores 0
Controle 7	Habilita saída <i>MSB</i> do grupo de contadores 0
Controle 8	Habilita saída <i>LSB</i> do grupo de contadores 1
Controle 9	Habilita saída <i>MSB</i> do grupo de contadores 1
Controle 10	Habilita saída <i>LSB</i> do grupo de contadores 2
Controle 11	Habilita saída <i>MSB</i> do grupo de contadores 2
Controle 12	Habilita saída <i>LSB</i> do grupo de contadores 3
Controle 13	Habilita saída <i>MSB</i> do grupo de contadores 3
Controle 14	Habilita saída <i>LSB</i> do grupo de contadores 4
Controle 15	Habilita saída <i>MSB</i> do grupo de contadores 4

entradas estão ligadas sempre em zero; quando a entrada de carregamento de dados recebe uma borda de subida, o contador terá zeros em sua saída.

A função de habilitação das saídas de dados envia um sinal em nível alto (1) para a entrada *enable* do registrador com saída *tri-state* (74HC374). Um sinal de nível alto na entrada de habilitação desse registrador faz com que sua saída saia do estado de alta impedância e apresente os últimos valores nele armazenados.

Cada grupo de contadores possui 16 bits de dados de saída e, por este motivo, são necessárias duas funções de habilitação de saídas para cada grupo de contadores, uma para os 8 bits menos significativos (*LSB* - *Least Significant Bits*) e outra para os 8 bits mais significativos (*MSB* - *Most Significant Bits*).

4 Projeto de Software

Este módulo é responsável pela interface entre o circuito eletrônico e o usuário, capturando sinais do circuito e transformando-os em pontos no espaço tridimensional. As próximas seções descrevem as principais etapas que compõem o projeto de software.

4.1 Entrada, Saída e Controle

Conforme mencionado na seção 3, o valor da posição corrente de cada *encoder* é decodificado em um número de 12 bits (16 no total e 12 válidos). Para realizar a correta operação do circuito, 16 sinais são necessários, de acordo com a tabela 2.

Utilizando-se apenas uma porta paralela, que disponibiliza 8 bits de saída ou entrada de dados, mais 4 bits de controle de saída, não seria possível fornecer todos os controles para o circuito e ainda realizar a leitura dos valores de cada *encoder*. Isso acontece porque, para

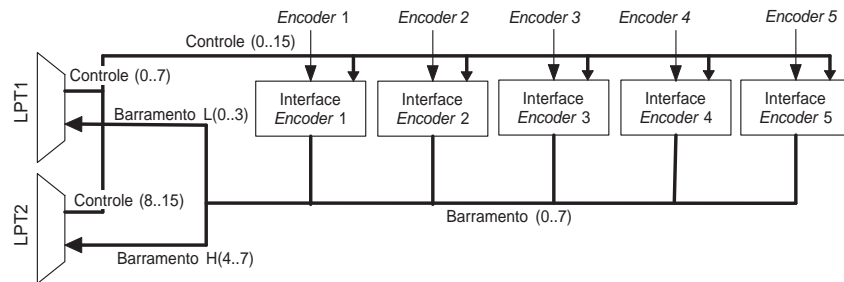


Figura 7: Esquema de ligação do circuito com o computador.

Tabela 2: Sinais utilizados da interface paralela.

Interface	Sinal	Função	Interface	Sinal	Função
LPT1	d0-1	Controle 0	LPT2	d0-2	Controle 8
LPT1	d1-1	Controle 1	LPT2	d1-2	Controle 9
LPT1	d2-1	Controle 2	LPT2	d2-2	Controle 10
LPT1	d3-1	Controle 3	LPT2	d3-2	Controle 11
LPT1	d4-1	Controle 4	LPT2	d4-2	Controle 12
LPT1	d5-1	Controle 5	LPT2	d5-2	Controle 13
LPT1	d6-1	Controle 6	LPT2	d6-2	Controle 14
LPT1	d7-1	Controle 7	LPT2	d7-2	Controle 15
LPT1	s3-1	Dados 0	LPT2	s3-2	Dados 4
LPT1	s4-1	Dados 1	LPT2	s4-2	Dados 5
LPT1	s5-1	Dados 2	LPT2	s5-2	Dados 6
LPT1	s6-1	Dados 3	LPT2	s6-2	Dados 7

se fazer a leitura dos dados da porta paralela, a leitura deve ser habilitada através do registrador de controle da porta. Portanto, o registrador de controle não pode ser utilizado para operar o circuito, uma vez que é requerido para a leitura dos dados.

Para aumentar o número de saídas de controle do circuito e efetuar a leitura em apenas dois passos para cada *encoder*, foram utilizadas duas portas paralelas. Os sinais de controle são enviados ao circuito através dos registradores de dados das portas paralelas 1 e 2 (LPT1 e LPT2), 16 bits no total, e os dados de entrada são lidos através dos registradores de *status* dessas duas portas, totalizando 8 bits de entrada. A figura 7 mostra um esquema modificado da interface entre o circuito (diagrama mostrado na figura 5) e o computador, agora demonstrando a utilização das duas portas paralelas.

O registrador de *status* disponibiliza somente 5 bits de um total de 8 para a entrada de dados, sendo que o mais significativo, s7 tem seu valor invertido durante a leitura da porta paralela. Para facilitar a implementação do software, este bit mais significativo é descartado na leitura, assim como os bits s0, s1 e s2. Estes bits são ignorados aplicando-se uma operação AND com o número 120, resultando em um número com os bits 2, 3, 4 e 5 originais, enquanto os outros são transformados em 0. Ainda é necessário efetuar uma operação de SHIFT

para a direita e para a esquerda nos valores lidos das portas 1 e 2 respectivamente, alinhando os valores para concatená-los em um passo posterior. Dessa forma, somente 4 bits de cada registrador de *status* são utilizados (s3, s4, s5 e s6).

Para formar o *byte* menos significativo, basta concatenar o valor lido da porta paralela 1 com o valor lido da porta paralela 2. A figura 8 mostra um exemplo desse processo em que os valores lidos das portas paralelas 1 e 2 têm seus bits s0, s1, s2 e s7 descartados e os dois valores são alinhados para a formação do número de 8 bits no final da operação.

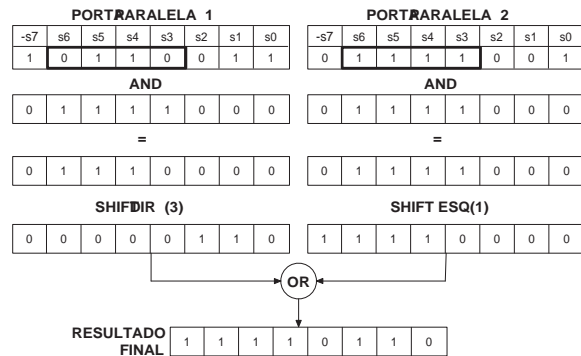


Figura 8: Exemplo de leitura dos valores da porta paralela pelo registrador de *status*.

Essa operação é repetida para a leitura dos 8 bits mais significativos. Esses 8 bits, adquiridos na segunda etapa da leitura de um *encoder*, passam ainda por uma operação de SHIFT para que possam ser finalmente concatenados com o valor anterior, formando um número de 16 bits, adequado para a representação dos valores entre 0 e 1200.

O processo de leitura dos valores dos *encoders* é então dividido em 11 passos, como demonstra a figura 9. O primeiro passo carrega os valores dos contadores nos registradores. O segundo passo habilita os valores menos significativos da interface 1, lendo-os em seguida.

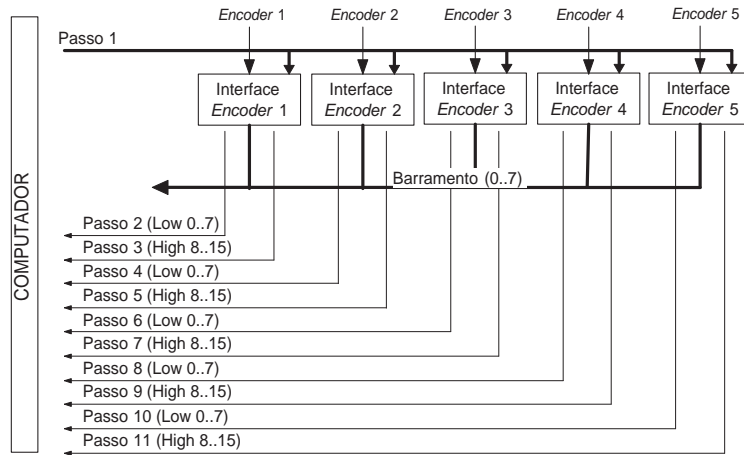


Figura 9: Passos necessários para se efetuar a leitura dos valores de todos os encoders.

O terceiro passo habilita os valores mais significativos da interface 1 e os lê. Essa operação é repetida para cada interface, de 1 a 5, utilizando-se os sinais de controle, relacionados na tabela 1.

4.2 Cinemática

A cinemática do digitalizador tridimensional descreve a posição da extremidade do braço em função dos ângulos medidos em cada articulação [2]. O cálculo da posição indicada pela ferramenta pode ser decomposto em uma série de transformações geométricas simples, como rotação e translação, expressas na forma de matrizes. Estas matrizes podem ser multiplicadas dando origem a três equações (uma para cada eixo de coordenadas) que relacionam a posição final do equipamento em função dos ângulos das articulações.

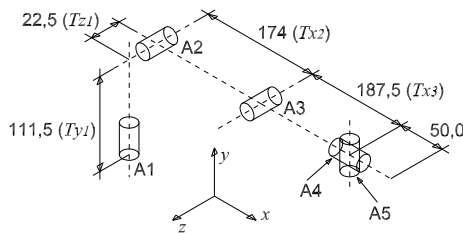


Figura 10: Deslocamentos absolutos entre os eixos principais do digitalizador tridimensional.

No caso do digitalizador tridimensional, as matrizes de transformação, apresentadas em (1), são baseadas nos eixos principais do braço, como mostra a figura 10. Os deslocamentos entre cada articulação são considerados sempre absolutos e as medidas opostas são desconsideradas para facilidade de cálculo. As matrizes

de transformação em (1) mostram o detalhamento das transformações geométricas necessárias para se calcular a posição da extremidade do braço.

$$\begin{aligned}
 R_y^{\theta_1} &= \begin{bmatrix} \cos \theta_1 & 0 & -\sin \theta_1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin \theta_1 & \cos \theta_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
 T_{z,y}^1 &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 111,5 \\ 0 & 0 & 1 & -22,5 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} R_z^{\theta_2} = \begin{bmatrix} \cos \theta_2 & -\sin \theta_2 & 0 & 0 \\ \sin \theta_2 & \cos \theta_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
 T_x^2 &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 174 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} R_z^{\theta_3} = \begin{bmatrix} \cos \theta_3 & -\sin \theta_3 & 0 & 0 \\ \sin \theta_3 & \cos \theta_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1) \\
 T_x^3 &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 187,5 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} R_x^{\theta_4} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ \cos \theta_4 & -\sin \theta_4 & 0 & 0 \\ \sin \theta_4 & \cos \theta_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
 R_y^{\theta_5} &= \begin{bmatrix} \cos \theta_5 & 0 & -\sin \theta_5 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin \theta_5 & 0 & \cos \theta_5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

As transformações geométricas são calculadas da direita para a esquerda, como se o ponto fosse calculado da extremidade do braço até a base. As rotações, denotadas como $R_{\text{Eixo}}^{\text{Articulação}}$, representam os movimentos das articulações do braço e são transformações sobre o Eixo da articulação *Articulação* e coincidem com os eixos axiais dos cilindros da figura 10. As translações, denotadas como $T_{\text{Eixo}}^{\text{Sequência}}$, estão relacionadas com o esquema da figura 10, assim como as rotações, que são denotadas como θ_{Eixo} . O deslocamento de 50 mm na extremidade do braço faz parte da ferramenta do braço

e, portanto, é parte da matriz F , a matriz que engloba todas as transformações geométricas pertinentes à ferramenta do braço.

A cinemática do modelo é obtida pela multiplicação das matrizes em (1), na seguinte ordem (no caso do digitalizador tridimensional, a matriz F representa as transformações da peça nomeada *Dedo*)

$$T_5^0 = (R_y^{\theta_1} T_{z,y}^1 R_z^{\theta_2} T_x^2 R_z^{\theta_3} T_x^3 R_x^{\theta_4} R_y^{\theta_5}) F \quad (2)$$

O produto de todas as oito matrizes é dado por

$$T = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & p_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & p_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

A ferramenta utilizada pelo braço tem comprimento igual a 50 mm. Este deslocamento coincide com o eixo x e, portanto, a matriz F tem a forma

$$F = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 50 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

Logo, o produto final entre a matriz de transformação T , a matriz *Ferramenta* e um ponto qualquer (x, y, z) resulta nas coordenadas do ponto transformado (X, Y, Z)

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & 50 r_{11} + p_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & 50 r_{21} + p_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & 50 r_{31} + p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

Como o ponto de coordenadas $(x, y, z, 1)$ é sempre a origem, as equações podem ser simplificadas, resultando em

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 50 r_{11} + p_x \\ 50 r_{21} + p_y \\ 50 r_{31} + p_z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

Finalmente, obtém-se as equações finais, que constituem a cinemática do digitalizador, ou seja, $X = 50 r_{11} + p_x$, $Y = 50 r_{21} + p_y$ e $Z = 50 r_{31} + p_z$.

4.2.1 Calibração

O processo de calibração é necessário porque o ângulo medido pelo *encoder* não é absoluto, ou seja, não há como determinar a posição angular da articulação sem uma posição de comparação. O processo de calibração, portanto, serve para inicializar os contadores quando a articulação se encontra em uma posição de referência, previamente conhecida.

Quando o circuito é ligado, há valores não confiáveis nos registradores e, para se obter a posição de um ponto qualquer, é preciso comparar a leitura atual com uma origem. Na calibração, esses pontos iniciais são definidos e o contador no circuito é iniciado com o valor zero. O ponto final, determinado pela rotação máxima da articulação, deve ser também obtido para eliminar diferenças de amplitude entre diversas calibrações.

Por esse motivo, para cada articulação existe um ponto inicial e final. A calibração verifica esses pontos para cada uma das articulações do braço, inicializando os contadores do circuito na posição inicial e armazenando o resultado final para calcular a escala *graus/pulso* com

$$\text{Escala}_{\text{graus/pulso}} = \frac{\text{Amplitude Angular}_{\text{Articulação}_i}}{\text{Leitura}_{\text{final}}} \quad (7)$$

A escala *graus/pulso* tem por objetivo distribuir o erro de leitura do ângulo final por todos os pulsos da articulação. Ao calibrar o braço, o operador pode não posicioná-lo de forma correta, ou ainda, um fator externo pode ocasionar o desalinhamento do disco do *encoder*, resultando em leituras diferentes entre diversas calibrações da mesma articulação.

Com a escala calculada basta multiplicá-la pelo valor lido durante operação do braço, obtendo o ângulo atual com relação à origem:

$$\gamma = \text{Pulsos} \times \text{Escala}_{\text{graus/pulso}} \quad (8)$$

onde γ é o ângulo formado pela posição atual da articulação com relação ao ângulo inicial. O ângulo 0, porém, nem sempre coincide com o ângulo inicial, portanto, θ é obtido como

$$\theta = (\alpha_f \pm \gamma) \quad (9)$$

em que α_f é o ângulo final, obtido do projeto mecânico e relativo ao ângulo $\theta = 0$.

A figura 11 mostra graficamente a utilização dessas equações e a tabela 3 mostra os valores dos ângulos inicial e final para as articulações do digitalizador. A precisão dos ângulos, em centésimos de grau, é distribuída ao longo dos pulsos da articulação, minimizando o erro no cálculo da posição angular dos segmentos.

A escolha da operação de adição ou subtração é feita com base no sentido de rotação do *encoder*. Se o sentido de rotação do *encoder* coincidir com o sentido de rotação utilizado no cálculo das matrizes, a operação utilizada deve ser a adição. Se o sentido de rotação do *encoder* é contrário ao utilizado no cálculo das matrizes, então a operação utilizada deve ser a subtração. No caso do digitalizador tridimensional, as articulações da base, do suporte e do dedo utilizam a operação de adição para a calibração. As articulações do cotovelo e do pulso utilizam a operação de subtração.

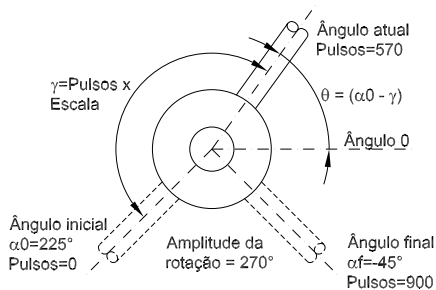


Figura 11: Representação gráfica das equações 8 e 9. A *Escala* é igual a 0,3, γ é igual a 171° e θ igual a 54° .

Tabela 3: Ângulos iniciais (α_0) e finais (α_f) de cada articulação do digitalizador tridimensional.

Articulação	Ângulo inicial	Ângulo final	Amplitude
1	$349,45^\circ$	0°	$349,45^\circ$
2	$219,32^\circ$	$-39,32^\circ$	$258,65^\circ$
3	$160,74^\circ$	$-160,74^\circ$	$321,48^\circ$
4	$-324,29^\circ$	$14,28^\circ$	$328,57^\circ$
5	$119,54^\circ$	$-119,54^\circ$	$239,08^\circ$

5 Resultados Experimentais

Para facilitar a detecção de falhas, os testes foram divididos em três passos: confiabilidade do *encoder*/contadores, testes bidimensionais e testes tridimensionais.

O teste de confiabilidade foi realizado individualmente com cada articulação. Cada uma delas foi movimentada em toda sua amplitude repetidamente. Os valores inicial e final de cada repetição foram comparados com a primeira leitura para que diferenças de amplitude fossem detectadas.

O segundo passo teve por objetivo analisar o comportamento dos *encoders* em conjunto, mas de forma limitada, digitalizando-se pontos em um plano. Em uma área plana foram traçadas linhas guia, com as posições conhecidas, que auxiliam a medição dos pontos indicados pelo digitalizador. Um quadrado de lado igual a 50 mm foi desenhado próximo à intersecção da linha de eixo (a linha reta que vai do suporte do digitalizador ao lado oposto da base) e o círculo de raio igual a 300 mm. Os pontos desse quadrado foram medidos cinco vezes consecutivamente, de modo a verificar a alteração da contagem dos pulsos emitidos pelo *encoder*.

Finalmente, o conjunto completo foi testado no último passo digitalizando-se um modelo tridimensional real com dimensões conhecidas.

Os resultados do primeiro passo dos testes demonstraram que a amplitude medida pelo conjunto *encoder*/contadores apresentava diferenças entre leituras di-

versas. Essas diferenças, mesmo que presentes, eram aceitáveis de no máximo 8 pulsos em 1000. Falhas graves, de mais de 8 pulsos, no entanto, foram detectadas em situações isoladas. Embora essas diferenças pudessem causar erros na leitura dos pontos, a ocorrência desse tipo de falha foi rara durante a execução do teste de confiabilidade.

No teste de digitalização bidimensional, em que os lados do quadrado para teste de digitalização bidimensional foram medidos repetidamente sem a calibração do braço, os resultados foram considerados aceitáveis. O resultado dos testes está representado graficamente na figura 12. Entre a segunda e a terceira leituras, a base do digitalizador sofre uma rotação para diferenciar as leituras um e dois das leituras três, quatro e cinco.

Tabela 4: Média da distância entre pontos subjacentes, que formam um lado do quadrado utilizado nos testes de leitura bidimensional.

Leitura	Média (mm)
Leitura 1	48,061
Leitura 2	44,319
Leitura 3	44,115
Leitura 4	43,732
Leitura 5	45,501

As distâncias entre os vértices subjacentes, que formam um lado do quadrado, têm em média 45,145 mm. Analisando os valores obtidos da digitalização para cada leitura, relacionadas na tabela 4, nota-se que a média da primeira leitura é mais próxima do valor real, de 50 mm. Este aumento no erro no decorrer das leituras é provavelmente causado pela imprecisão na leitura da amplitude das articulações (constatados no teste de confiabilidade) e pode ser evitado com a calibração mais freqüente do equipamento. O valor de 45,501 mm na última leitura deve-se a um erro maior que a média durante a leitura do ponto situado no canto inferior esquerdo da figura 12. O quadrado original tinha 50 mm de lado e o quadrado com borda dupla representa o quadrado de tamanho original.

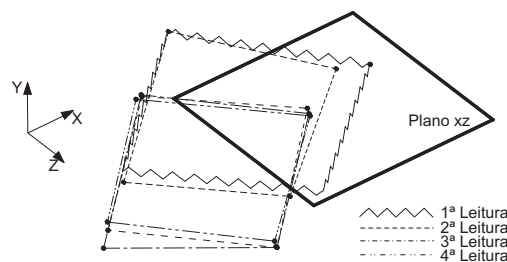


Figura 12: Digitalização do quadrado para teste de digitalização bidimensional.

O modelo escolhido para o teste de digitalização tri-

dimensional foi uma escultura em bronze de dimensões aproximadas $170 \times 170 \times 110$ mm. Por conter muitos detalhes, apenas um lado da peça foi escolhido para ser digitalizado, totalizando 6 pontos. A figura 13 mostra o resultado da digitalização. O plano xz serve apenas para referência, assim como as linhas tracejadas que mostram a distância perpendicular dos pontos até o plano xz .

Ao contrário do teste com o modelo bidimensional, os resultados mostraram uma grande diferença entre os pontos digitalizados e os originais. Quando um número maior de pontos da escultura foi digitalizado, o modelo virtual perdeu significativamente a forma, comparada com o objeto real.

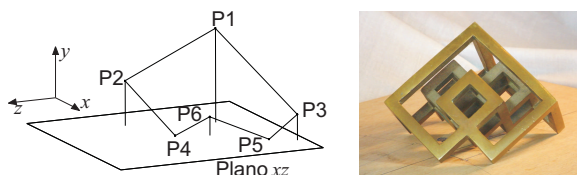


Figura 13: Medidas efetuadas do modelo real utilizado para os testes tridimensionais e a foto da escultura utilizada como modelo.

A distância entre os pontos $P2$ e $P3$, que no modelo real é de aproximadamente 151 mm, ficou com 165,75 mm. Também diferente do modelo bidimensional, a digitalização desse modelo não apresentou um aumento sucessivo do erro na leitura dos pontos.

6 Conclusões

Este trabalho apresentou um projeto completo de um digitalizador tridimensional de pequenas proporções. O custo total dos materiais utilizados no sistema foi inferior a 600 dólares.

O projeto mecânico foi desenvolvido completamente porque a aquisição de um dispositivo comercial para reengenharia foi considerado inviável financeiramente, assim como adquirir um projeto de um profissional especializado. O circuito eletrônico foi projetado de forma a preencher os requisitos mínimos para transferência dos dados lidos dos *encoders* ao computador e o software foi preparado para interagir com o circuito, capturando os pontos automaticamente ao comando do usuário, representando-os de forma tridimensional para facilidade de compreensão.

Embora os testes não tenham apresentado valores satisfatórios em alguns casos, o protótipo mostrou obter boa precisão na digitalização dos pontos seguidos à calibração. O acúmulo de erros é devido à baixa qualidade dos *encoders* que não são produzidos com a finalidade de aplicações em ferramentas de precisão. Uma

calibração dos elos, além dos *encoders*, deve aumentar a precisão absoluta do sistema.

Os resultados demonstraram que é possível desenvolver um projeto de baixo custo e com precisão aceitável para uso em muitas aplicações práticas.

Referências

- [1] Borghese, N. A., Ferrigno, G., Baroni, G., Pedotti, A., Ferrari, S., and Savare, R. Autoscan: A Flexible and Portable 3D Scanner. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 18(3):38–41, Maio/Jun. 2003.
- [2] Craig, J. *Introduction to Robotics: Mechanics and Control*. Addison-Wesley Publishing Company, New Jersey-NJ, Estados Unidos, 1989.
- [3] Fangi, G., Fiori, F., Gagliardini, G., and Malinverni, E. S. Fast and Accurate Close Range 3D Modelling by Laser Scanning System. In *CIPA International Symposium*, pp. 196–203, Potsdam, Alemanha, 2001.
- [4] Gonzo, L., Simoni, A., Gottardi, M., Stoppa, D., and Beraldin, J.-A. Sensors Optimized for 3-D digitization. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 52(3):903–908, Jun. 2003.
- [5] Kuo, C.-H., Tsai, Y.-L., Huang, F.-C., and Lee, M.-Y. Development of Image Servo Tracking Robot for the Surgical Space Positioning System. In *IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, v. 5, pp. 4462–4467, Out. 2004.
- [6] Lemmens, M. J. P. M. and van den Heuvel, F. A. 3D Close-range Laser Mapping Systems : Detailed and Accurate 3D Object Models from Laser. In *GIM International*, pp. 30–33, Jan. 2001.
- [7] Mason, M. T. *Mechanics of Robotic Manipulation*. MIT Press, 2001.
- [8] Tran, M., Datta, A., and Lowe, N. A Simple Model Generation System for Computer Graphics. *Future Generation Computer Systems*, 21(7):1223–1234, Jul. 2005.
- [9] Valeri, C. J., Cole, T. M., Lele, S., and Richtsmeier, J. T. Capturing Data from Three-dimensional Surfaces Using Fuzzy Landmarks. *American Journal of Physical Anthropology*, 107(1):113–124, Dez. 1998.