

ESTUDO DA CINEMÁTICA INVERSA APLICADA NUM BRAÇO ROBÓTICO

Flávia Moreira dos Santos
Universidade Braz Cubas – Engenharia da Computação
Rua. José Guimarães Pera, 120, Mogi das Cruzes, SP – Cep: 08717-885
fmoreira25@yahoo.com.br

Émerson Teruhiko Watanabe
Universidade Braz Cubas – Engenharia da Computação
Rua Antônio Viana, 318, São Miguel, SP – Cep:08080-190
et_ni@yahoo.com.br

Valdemir Carrara
Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE)
Av. dos Astronautas, 1758, São José dos Campos, SP – Cep: 12225-010
Universidade Braz Cubas
val@dem.inpe.br

Resumo: Neste trabalho desenvolveu-se um braço robótico articulado com dois graus de liberdade, de estrutura centralizada, com o objetivo de informar os conceitos e mostrar, didaticamente, as características que compõem um braço robótico. Na extremidade do braço foi adaptada uma caneta posicionada verticalmente com o propósito de escrever palavras em letras de fôrma com dimensões e ângulos variados.

A estrutura física foi feita com material leve e suas juntas acionadas por motores de passos, com uma bobina eletromagnética para movimentar a caneta para cima e para baixo. Foi também desenvolvido um programa de controle contendo as equações da cinemática inversa e das transformações de translação, de escala e de rotação com o intuito de orientar o braço robótico a escrever a palavra no plano bidimensional.

Para validar as equações e o algoritmo utilizou-se, primeiro, o Matlab, no qual gerou-se um gráfico que mostra o desenho de uma palavra e a representação de um braço em vários estágios na escrita. Em seguida implementou-se o código do Matlab em linguagem C.

Os resultados obtidos na execução do processo de escrita do braço robótico foram satisfatórios, compatíveis com a precisão e resolução dos motores.

Palavras-chaves: cinemática inversa, robótica, programação.

1. Introdução

O objetivo deste trabalho é desenvolver um pequeno braço robótico com duas articulações para uso como material educacional e didático, tendo como principal requisito apresentar um baixo custo de material, para que possa ser facilmente reproduzido.

Este requisito será atendido com um projeto que utiliza materiais leves, elos pequenos e acionamento por motores de passos com redutores, facilmente encontrados em casas de materiais reciclados de informática. Para cumprir o objetivo de material didático, será estabelecido que o braço seja dotado de uma caneta e que consiga escrever um texto como um “plotter”. Porém, ao contrário de um plotter convencional que trabalha em duas direções ortogonais, este braço irá mover-se na horizontal por meio de duas juntas rotativas. A caneta deverá ser acionada por uma bobina eletromagnética e deverá escrever letras numa folha de papel. Por utilizar juntas rotativas, este braço poderá servir como exemplo no ensino da cinemática inversa de robôs industriais. O sistema de controle deverá ser efetuado por um computador pessoal (PC), com comunicação pela linha paralela. Uma eletrônica simples deverá fazer a interface entre os sinais do computador e o comando para acionamento dos motores.

Este trabalho procura, assim, oferecer aos alunos da área de tecnologia um projeto de grande simplicidade, para que possam avaliar a importância da robótica e ao mesmo tempo incentivar a aplicação de novas tecnologias, como a visão computacional, músculos artificiais, modelagem, realidade virtual e comparações de técnicas alternativas.

Finalmente deve-se ressaltar que, por se tratar de um assunto que envolve um conhecimento multidisciplinar (eletrônica de interface, cinemática inversa, mecânica, acionamento por motores de passos, programação, etc.) o processo de montagem dos circuitos e das estruturas requerem conhecimento rudimentares de mecatrônica e habilidade manual.

A seção 2 é abordada a fundamentação teórica em relação à área da Robótica. Na seção 3 é apresentado o desenvolvimento do projeto, o qual constitui-se do desenho e modelagem da estrutura física do braço, do desenvolvimento do circuito de interface digital que é utilizado para o controle e comunicação do braço robótico, e do fluxograma do sistema de controle do processo de escrita. Na seção 4 são demonstrados os resultados obtidos e, por fim, são apresentadas as principais conclusões do projeto.

2. Braço robótico

Um braço robótico é composto por uma base, braço, antebraço e pulso, denominados elos (Groover e outros, 1988). Para a conexão desses elos são usadas juntas, onde são acoplados os acionadores para realizarem os movimentos dos elos individualmente, com capacidade sensorial, e instruído por um sistema de controle. Na extremidade do braço existe um órgão terminal (mão ou ferramenta) que está interligada ao pulso. O pulso consiste de inúmeros componentes que permitem a orientação do órgão terminal nas posições que correspondem à tarefa a ser realizada. Como conseqüência, a quantidade de graus de liberdade de um robô define a quantidade de movimentos possíveis.

2.1. Cinemática

A cinemática trata do estudo dos movimentos dos robôs sem considerar as causas que lhes dão origem (Groover e outros, 1988). Para tratar dos movimentos dos manipuladores é necessário desenvolver técnicas para representar a posição de determinado ponto do braço no tempo. Esta representação depende da posição das juntas e dos elos, sendo que é necessário ter a base do robô como ponto de referência. A Figura 1 mostra a forma geométrica de um braço articulado simples do tipo *RR* (duas juntas rotativas) com dois graus de liberdade movendo-se em um plano.

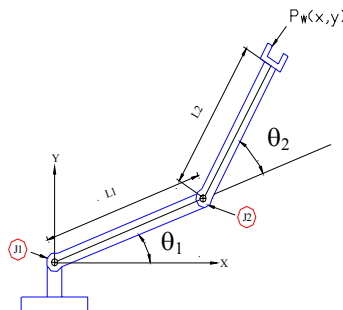


Figura 1. Esquema de um braço articulado com dois graus de liberdade e movimento plano.

As juntas são rotuladas com J_n , onde n começa com 1 na base do braço robótico, e os elos são rotulados por L_n , novamente sendo 1 o elo mais próximo da base. Sendo assim, é possível aplicar métodos matemáticos para calcular o posicionamento do braço robótico numa determinada posição, desde que se conheçam os ângulos das juntas num dado instante. Essa posição pode ser obtida por meio de sensores localizados nas juntas, os quais podem medir os ângulos θ_1 e θ_2 , e, assim, as posições x e y são expressas em função desses ângulos. Isso é conhecido como a representação no espaço de “junta”. Contudo, muitas vezes é necessário aplicar o inverso, isto é, calcular θ_1 e θ_2 em função de x e y , sendo conhecido como a representação no espaço cartesiano.

2.1.2 – Cinemática direta

A cinemática direta constitui da necessidade de ir do espaço de junta para o espaço cartesiano. O problema da cinemática direta consiste então em determinar, a partir dos ângulos das juntas, a posição cartesiana da extremidade do braço. Definindo um vetor para o elo 1 e outro para o elo 2, um braço *RR* tem como equações da cinemática direta:

$$x = l_1 \cos \theta_1 + l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \quad (1)$$

$$y = l_1 \sin \theta_1 + l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) \quad (2)$$

A precisão deste braço varia no volume de trabalho, e é dada por

$$\Delta r = \sqrt{(\Delta x^2 + \Delta y^2)} \quad (3)$$

onde Δx e Δy são as precisões cartesianas obtidas por meio de:

$$\Delta x = |l_1 \sin \theta_1 + l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2)| \Delta \theta_1 + |l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2)| \Delta \theta_2 \quad (4)$$

$$\Delta y = |l_1 \cos \theta_1 + l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2)| \Delta \theta_1 + |l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2)| \Delta \theta_2 \quad (5)$$

no qual l_1 e l_2 são os comprimentos dos elos e $\Delta \theta_1$ e $\Delta \theta_2$ são as resoluções das juntas 1 e 2 (principal fator que influência a precisão).

2.1.3 – Cinemática Inversa

Usando as equações da cinemática direta, é possível determinar as coordenadas x e y de um manipulador de dois graus de liberdade do tipo RR , uma vez conhecidos os ângulos das juntas θ_1 e θ_2 . Entretanto, em alguns casos é necessário calcular os ângulos das juntas a partir das coordenadas cartesianas. No caso do robô RR , fornecida a posição do órgão terminal no espaço cartesiano (x, y) , então é possível inverter as equações da cinemática direta e calcular os ângulos θ_1 e θ_2 pelos pontos conhecidos, de modo a posicionar o órgão terminal neste ponto. Este problema é mais complicado que a cinemática direta, pois as equações envolvidas são não-lineares. A cinemática inversa apresenta duas soluções possíveis, conforme mostra a Figura 2, com o cotovelo acima ($\theta_2 < 0$) e cotovelo abaixo ($\theta_2 > 0$).

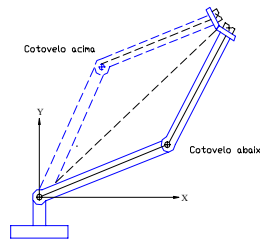


Figura 2. – Soluções possíveis para a cinemática inversa (cotovelo acima e abaixo).

Aplicando-se a lei dos co-senos ao triângulo formado pelo centro das duas juntas e pela posição do órgão terminal, consegue-se obter o valor do ângulo θ_2 , dado por:

$$\theta_2 = \pm \arccos \left(\frac{x^2 + y^2 - l_1^2 - l_2^2}{2 l_1 l_2} \right) \quad (6)$$

Por outro lado, da trigonometria tira-se que

$$\tan \beta = \frac{PQ}{l_1 + RQ} = \frac{l_2 \sin \theta_2}{l_1 + l_2 \cos \theta_2} \quad (7)$$

e

$$\tan \alpha = \frac{y}{x} \quad (8)$$

Usando a identidade trigonométrica

$$\tan \theta_1 = \tan(\alpha - \beta) = \frac{\tan \alpha - \tan \beta}{1 + \tan \alpha \tan \beta} \quad (9)$$

e uma vez que $\theta_1 = \alpha - \beta$, obtém-se

$$\tan \theta_1 = \frac{y(l_1 + l_2 \cos \theta_2) - x l_2 \sin \theta_2}{x(l_1 + l_2 \cos \theta_2) + y l_2 \sin \theta_2} \quad (10)$$

A equação 6 possibilita achar o valor de θ_2 tanto para a solução cotovelo acima quanto abaixo, e a última equação permite obter os valores de θ_1 associados às soluções de θ_2 .

2.2 – Transformações geométricas

As transformações gráficas - (Azevedo e Conci, 2003, Watt, 1997) permitem mover e manipular figuras geométricas - no plano - ou no espaço. As transformações utilizadas neste trabalho foram a translação, rotação e escala. Essas transformações podem ser colocadas na forma de matrizes e combinadas para construir transformações mais complexas. Neste caso, o sistema de coordenada nas transformações realizadas deve permanecer fixo.

A translação de um determinado vértice P , pertencente a um objeto de coordenadas bidimensional ou tridimensional, acontece pelo deslocamento de um vetor $V = (v_x, v_y, v_z)$, e com isso obtém-se uma nova posição, P' .

A escala modifica as dimensões dos objetos: o objeto é aumentado se o valor for maior que 1, e reduzido caso contrário.

As rotações visam orientar o objeto para direções específicas no espaço. As rotações são sempre efetuadas ao redor de um eixo de coordenadas.

3. Desenvolvimento do projeto

O desenvolvimento do projeto consiste do planejamento da estrutura física do braço robótico, da bobina eletromagnética para acionamento da caneta (órgão terminal), do circuito digital, da comunicação de dados e do desenvolvimento do código computacional em linguagem C. Decidiu-se fixar o comprimento dos elos em 200 mm, para que fosse possível escrever com facilidade em qualquer ponto de um papel de tamanho A4. Em virtude da complexidade de controle de motores DC, que exigem sistema de realimentação e *encoders* para leitura da posição angular dos elos (Groover, 1988), resolveu-se empregar motores de passo no acionamento, que apresentam características desejadas de torque, facilidade de aquisição e baixo custo. Estes motores não exigem sistema de realimentação de posição, mas é necessário contar os pulsos enviados a eles para se ter sua provável posição. Contudo, é necessário que se conheçam os ângulos pelo menos numa posição, a partir da qual todas as outras são referenciadas. Esta posição é obtida por meio de um sensor do tipo fim-de-curso que é acionado sempre que o braço atinge uma determinada posição (conhecida como “home”).

3.1 – Estrutura física do braço robótico

A concepção da estrutura física do braço robótico envolve duas partes principais e correlacionadas: a arquitetura e o material utilizado. Utilizou-se chapa de alumínio de 1mm de espessura, pois se trata de um material ideal para a confecção de braços robóticos, já que possui propriedades físicas que atendem as necessidades deste projeto, como por exemplo, a rigidez mecânica, o fácil manuseio, a leveza e efeito final agradável.

A estrutura física do braço robótico é constituída de uma base, um braço, um antebraço e um órgão terminal. A base tem a função de proporcionar a sustentação de toda a estrutura física e possui um motor de passos (J_1) responsável pela rotação horizontal do braço (elo l_1) e antebraço (elo l_2). O braço possui um motor de passos (J_2) em sua extremidade, o qual proporciona a rotação do antebraço e do órgão terminal. O órgão terminal possui uma haste de sustentação para a caneta, posicionada verticalmente, um atuador que consiste de uma bobina eletromagnética e uma mola de retorno que realiza os movimentos de abaixar e levantar a caneta.

Para melhorar a precisão (ou a resolução) das juntas, e uma vez que os torques gerados pelos motores de passos são baixos, optou-se por utilizar acionamento indireto, ou seja, um redutor de engrenagens acoplado ao eixo do motor. A redução permite aumentar a resolução ou precisão do braço, pois reduz o passo do motor no eixo de

articulação da junta. Entretanto, o uso de engrenagens requer cuidados de montagem, pois suas folgas poderão influenciar no desempenho dinâmico do braço robótico. A Tabela 1 mostra as principais características do braço robótico projetado.

Tabela 1 – Característica do braço robótico articulado

Propriedades	Modelo
Graus de Liberdade	2
Acionador	Elétrico – motor de passos
Métodos de Acionamento	Acionamento indireto – Engrenagens
Tipo de junta	Rotativa
Sensor de “home”	Sensor eletromagnético
Articulação	Horizontal
Órgão Terminal	Caneta - Bobina eletromagnética

Após a definição das características do braço robótico, foram feitos os desenhos para a confecção da base e dos elos no Autocad. A Figura 3 mostra a arquitetura do braço robótico resultante deste projeto.

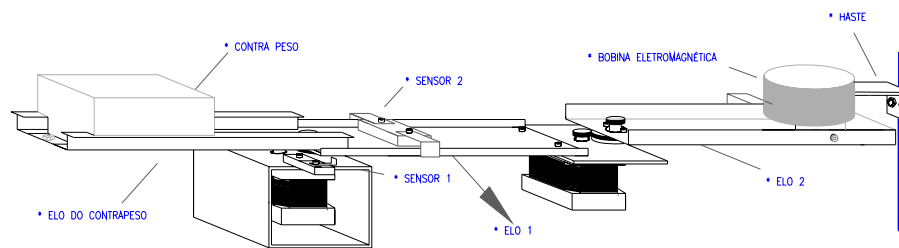


Figura 3. – Arquitetura do braço robótico articulado.

3.2 – Área de Trabalho

Os valores limites dos ângulos θ_1 e θ_2 , podem ser vistos na Figura 4. Como o braço movimenta-se num plano, ele não possui volume de trabalho mas sim área de trabalho. Esta área pode ser estimada a partir dos ângulos limites do movimento, que são $-89^\circ < \theta_1 < 268^\circ$ e $-160^\circ < \theta_2 < 163^\circ$.

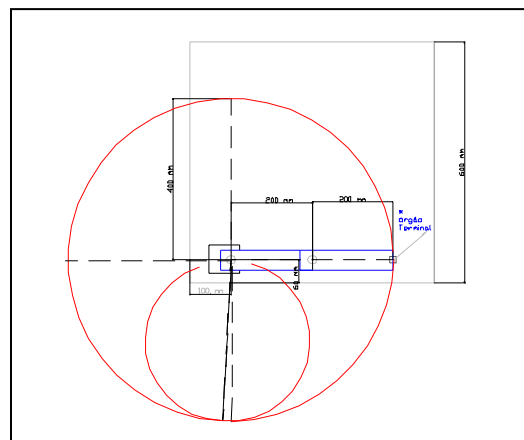


Figura 4. – Área de trabalho do braço robótico.

3.3 – Sistema de Comunicação

Para comandar o braço a partir de um computador pessoal foi empregada a interface paralela, usualmente utilizada na comunicação com impressoras. Esta interface é bidirecional, ou seja, possui pinos de entradas e saídas de dados. A transmissão usou o modo EPP (“Enhanced Parallel Port”), que deve ser configurado no “Setup” do computador.

Usou-se o cabo paralelo com conexão DB25, recomendado somente para conexões diretas entre o computador e a impressora. A configuração dos pinos utilizados para a transmissão de sinais e controle dos motores é indicada na Tabela 2.

Tabela 2– Descrição dos pinos utilizados na porta paralela

Pinos	Descrição	Nomenclatura
2	Direção motor 1	D1
3	Pulso motor 1	S1
4	Direção motor 2	D2
5	Pulso motor 2	S2
6	Bobina	B
10	Sensor para elo 1	P1
12	Sensor para elo 2	P2
18-25	Terra	T

3.4 – Sensores eletromagnéticos

Utilizou-se dois sensores eletromagnéticos da marca Festo, modelo SMEO-4U-K-LED24 para indicar as posições limites dos elos (posição “home”).

O sinal dos sensores é ativado quando os ímãs localizados nos elos se aproximam a 5 mm do sensor, o que causa o aterramento dos pinos 10 e 12 da porta paralela e indica ao programa de controle a posição dos elos. Essas posições são, no elo 1, $\theta_1 = -89^\circ$ e $\theta_2 = 162,75^\circ$.

3.5 – Acionamento dos motores de passos

Usou-se motores de passos devido às necessidades do projeto, isto é, o motor de passos possui características que proporcionam eficiência de posicionamento, médio consumo de energia, dimensões e pesos razoáveis, torque satisfatório e é controlado por sinais digitais. Algumas características dos motores de passos utilizados são: passo angular de $1,8^\circ$ graus por passo, tensão de alimentação de 5 volts, corrente máxima de 1 Ampere e impedância de 4,1 ohms.

Considerando a precisão de $1,8^\circ$ no eixo do motor, são necessários 200 passos para o motor rotacionar 360° graus. Porém, com o uso do redutor (Pinhão e Coroa), o número de passos é ampliado pela relação de redução. Esta relação é de 4,8, já que o pinhão possui 15 dentes e a coroa 72. Com isso, são necessários 960 passos no eixo do motor para proporcionar a rotação de 360° na junta.

É importante ressaltar que a forma com que o motor irá operar dependerá bastante do que se deseja controlar. Existem casos em que o torque é mais importante, outras a precisão ou mesmo a velocidade. O motor pode operar em passo completo, que neste caso provoca um deslocamento angular de $1,8^\circ$ por passo ou em meio passo que produz deslocamento de $0,9^\circ$ por passo.

3.6 – Resolução cartesiana

A resolução angular das juntas incluindo o redutor é dada por

$$\Delta\theta_i = \frac{p}{n} \quad (11)$$

onde p é o passo utilizado ($1,8^\circ$) e n é a relação de redução (4,8), e $i = 1, 2$. Tem-se portanto que $\Delta\theta_1 = \Delta\theta_2 = 0,375^\circ$. Com base nas equações 3 e 4 e considerando-se o comprimento dos elos de 200 mm, calculou-se a precisão cartesiana do braço em diversas situações mostradas na Tabela 3. Percebe-se que a precisão é pior quando o braço estiver esticado, já que a extremidade desloca-se de quase 4 mm num único passo.

Tabela 3 – Precisões do braço robótico

Ângulo θ_1	Ângulo θ_2	Δx	Δy	Δr	Condição
0°	0°	0	3,96	3,96	Braço esticado
0°	90°	2,36	1,38	2,73	Braço dobrado
$-88,875$	$159,375$	1,55	1,29	2,01	Braço Recolhido

3.1. – Circuito de interface digital

O circuito digital foi desenvolvido considerando as características físicas dos componentes que constituem o braço robótico e os pinos de entradas e saídas disponíveis na porta paralela. A Figura 5 mostra o diagrama de acionamento dos motores, da bobina e leitura dos sensores.

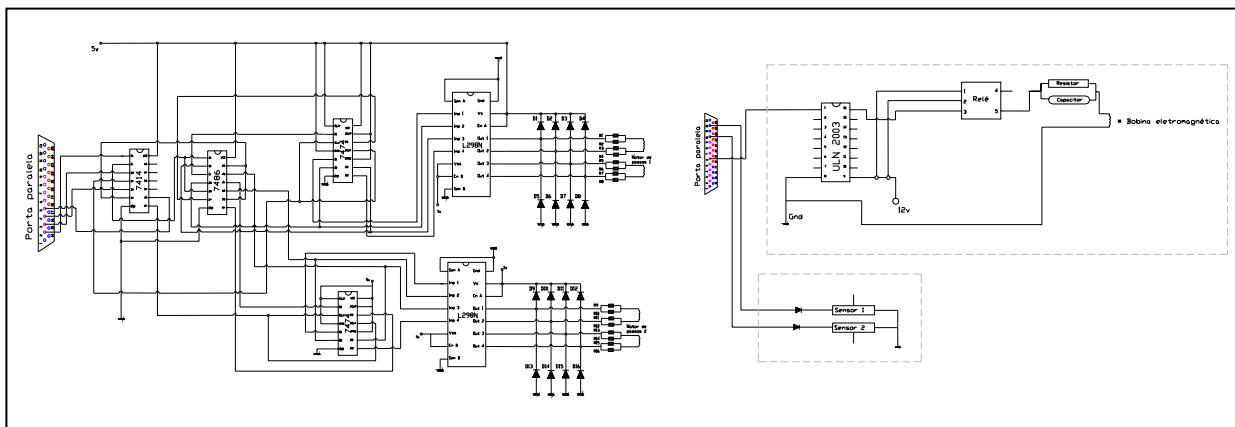


Figura 5 - Diagrama do circuito de acionamento dos motores bipolares e o circuito de acionamento da bobina e da leitura dos sensores eletromagnéticos.

Os sinais de entradas do circuito de acionamento dos motores de passos são pulsos enviados pelo microcomputador em intervalos de 20 milissegundos entre dois níveis lógicos.

O CI 7414 visa proteger a porta paralela e os componentes do circuito integrado de eventuais danos causados por fugas de correntes. O CI 7486 tem a função de proporcionar a direção de rotação (horário ou anti-horário) dos motores de passos e pelo envio dos sinais de entrada para o CI 7474.

Cada sinal digital enviado do CI 7414 em nível lógico zero aciona os circuitos integrados 7474 pelos pinos 3 e 11, definidos como pinos de “clock”. Os sinais de entrada são realimentados com os sinais de saída dos próprios circuitos integrados 7474, proporcionando a inversão dos sinais de entrada em cada pulso dado.

A seguir, os sinais resultantes dos circuitos integrados anteriores passam pelo CI L298N que envia os sinais para os motores de passos com uma corrente de 1,0A, amplificando o sinal digital.

Para o circuito de acionamento da bobina eletromagnética foram utilizados o CI ULN2003, um relé de 12 V, um resistor de 10Ω de 25W e um capacitor de $1200\mu F$ de 30V. O CI ULN2003 é utilizado como interface entre a porta paralela e o circuito de acionamento da bobina, pois este circuito integrado tem a função de receber o sinal digital do microcomputador e amplificar para tensões de até 50V. No entanto, ele não suporta correntes maiores que 0,5A, justificando a utilização do relé de 12V, já que a bobina eletromagnética, neste caso, necessita de 0,8A de corrente para ser acionada. Já o resistor, o capacitor e a bobina foram ligados em paralelo para proporcionar um pico de tensão em 12V e em seguida a queda de tensão para 6V, pois para que a caneta seja acionada para baixo é necessária uma tensão de 12V, porém, para sustentá-la abaixada, basta uma tensão de 6V.

Para o acondicionamento dos sinais dos sensores eletromagnéticos utilizaram-se dois diodos 1N4007, para proteger a porta paralela.

3.7 – Software

A implementação deste projeto exigiu o desenvolvimento de vários algoritmos e programas computacionais. Inicialmente testou-se os algoritmos e equações da cinemática direta e inversa no Matlab, a fim de fazer uma simulação do movimento do braço no plano bidimensional. Posteriormente estes algoritmos foram transferidos para linguagem C, incluindo aqueles relacionados com as equações da transformação geométrica (rotação, translação, escala). Foram a seguir acrescentados os códigos para controle e acionamento dos motores de passos e da bobina eletromagnética.

3.7.1 – Simulação da cinemática inversa e transformações geométricas

A simulação teve como objetivo demonstrar a validade das equações e algoritmos das transformações geométricas e da cinemática inversa, que relacionam o posicionamento de um braço robótico com os ângulos das juntas. Antes, de simular as equações no Matlab, foi necessário compor os vértices (coordenadas) das letras. Os vértices foram obtidos manualmente (um a um), desenhando-se as letras maiúsculas do alfabeto latino num papel quadriculado, com padrão de 1cm por 1cm, no qual foi reservado um espaço para a letra e um espaçamento entre letras, conforme pode ser visualizado no exemplo da letra “A” mostrado na Figura 6.

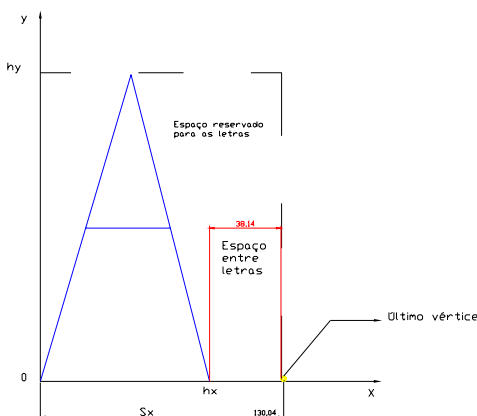


Figura 6. – Sistema de coordenadas utilizado na determinação das coordenadas dos vértices das letras do alfabeto.

As coordenadas dos vértices são inseridas a seguir numa tabela de forma a criar uma seqüência lógica de vértices adjacentes que formam as linhas de cada letra. Um vetor de zeros e uns, denominado “*status_pen*”, também ordenados seqüencialmente, indica o acionamento da bobina eletromagnética, e permite que a caneta seja levantada para desenhar uma outra parte da letra. A Tabela 4 mostra um exemplo de coordenadas dos vértices da letra A e seu *status_pen*.

Tabela 4- Coordenadas da letra A e seu *status_pen*

Vértice	x (mm)	y (mm)	<i>status_pen</i>
1	0	0	0
2	0,3	1,0	1
3	0,6	0	1
4	0,5	0,4	0
5	0,1	0,4	1
6	1,0	0	0

Com as coordenadas dos vértices desenvolveu-se o fluxograma para as equações da cinemática inversa e transformações geométricas, conforme pode ser visualizado na Figura 7.

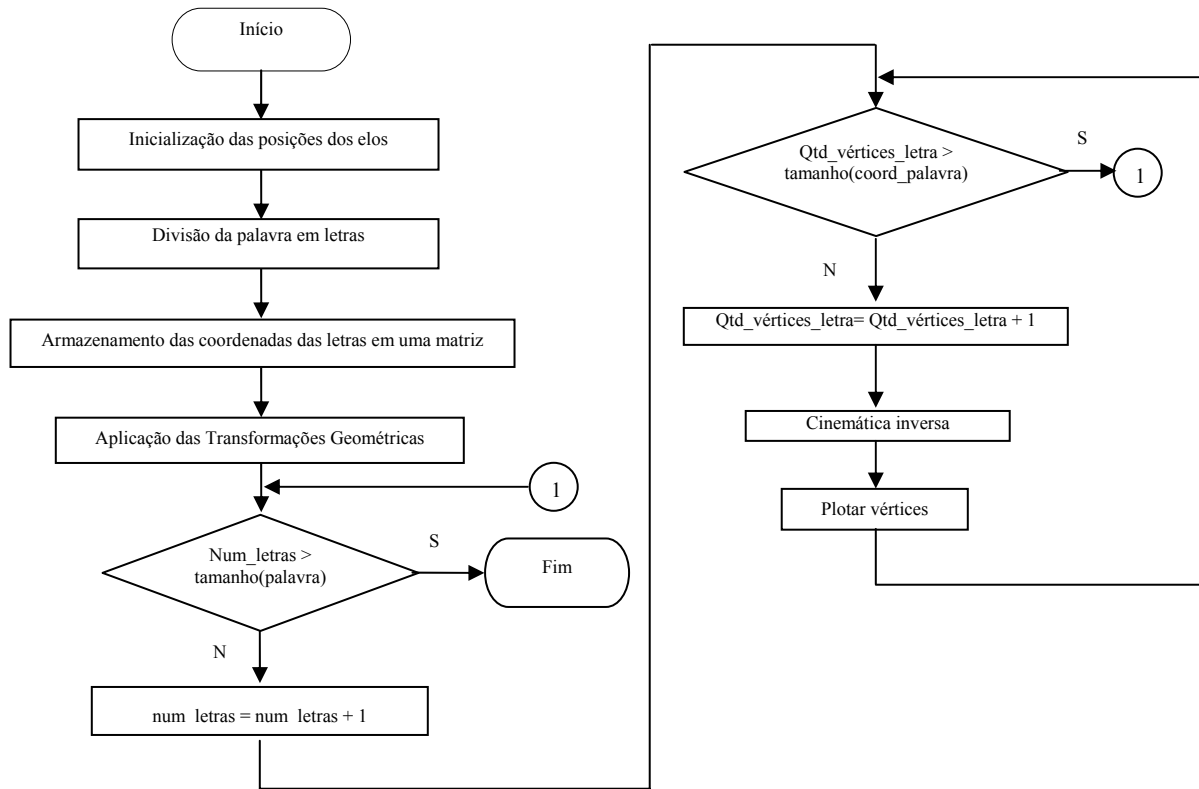


Figura 7 - Fluxograma para o desenho das letras

Desta forma, obteve-se como resultado da simulação o gráfico da Figura 8, onde usou-se como exemplo a palavra “VAL” formada com ângulo de 20° em relação ao eixo x, com escala uniforme de duas unidades e translação de duas unidades no eixo x, e duas unidades ao eixo y.

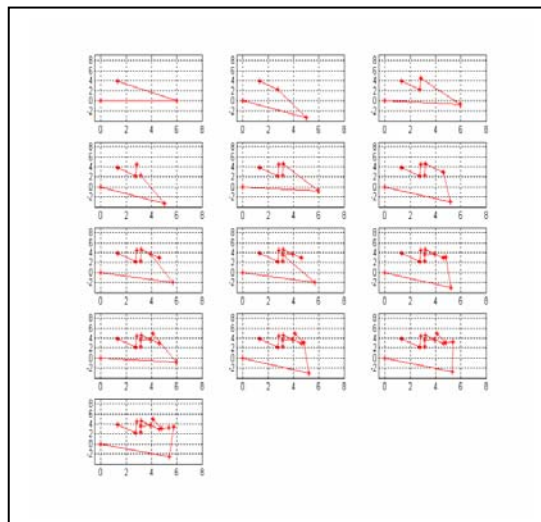


Figura 8 – Gráficos obtidos na simulação do algoritmo de cálculo da cinemática inversa e das transformações geométricas, desenvolvido no aplicativo Matlab. A palavra escrita no gráfico é VAL, em um ângulo de 20° em relação ao eixo x, com escala uniforme de duas unidades e translação de duas unidades ao eixo x e y.

4 – Resultados obtidos

Foram efetuados alguns testes com o braço robótico que permitem avaliar a resolução e precisão atingidas no projeto. Os testes consistiram de comandos para desenhar letras e palavras de diferentes tamanhos, com posições e orientações distintas.

O primeiro teste realizado foi com a letra “A” do alfabeto latino, mostrado na Figura 9, sem alteração de escala ou rotação, onde percebe-se a distorção significativa devido à flexibilidade e folga das juntas.

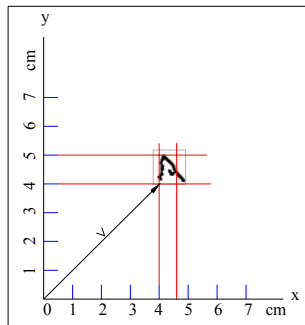


Figura 9– Resultado da letra “A”, com ângulo de rotação de 0° , escala de 1cm e translação de 4cm em x e 4cm em y

Em seguida, aumentando-se o valor da transformação de escala para 4 cm, obteve-se a letra mostrada na Figura 10. É possível observar que o aumento da escala levou a uma letra mais legível.

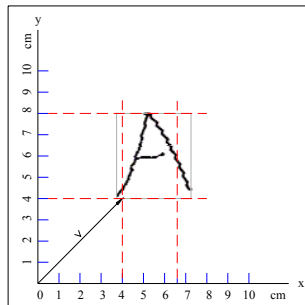


Figura 10 – Resultado da letra “A”, com ângulo de rotação de 0° , escala de 4cm e translação de 4cm em x e 4cm em y

A partir disso fez-se um teste com a letra R, com rotação de 90° graus, translação de 10 cm em x e 10 cm em y e escala de 6 cm, obtendo-se um resultado regular, conforme pode ser visualizado na Figura 11.

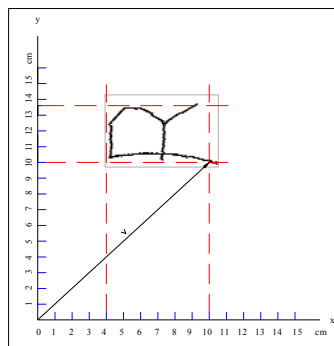


Figura 11 – Resultado da letra “R”, com ângulo de rotação de 90° , escala de 6cm e translação de 10cm em x e 10cm em y

Com a palavra “SALA”, mostrada na Figura 12, obteve-se um resultado regular. Comprovou-se que o espaçamento entre letras foi efetuado corretamente na separação entre elas. Além disso, as transformações geométricas (rotação de 0° , escala de 4cm e translação de 6cm em x e 6cm em y) foram realizadas com coerência.

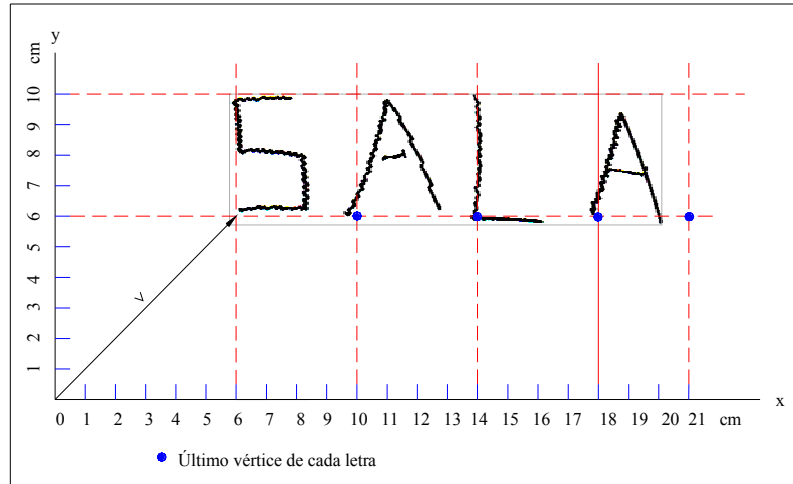


Figura 12 – Resultado da palavra “SALA”, com ângulo de rotação de 0° , escala de 4cm e translação de 6cm em x e 6cm em y

Na palavra “TGI”, mostrada na Figura 13, foi aplicada uma rotação de 45° , uma translação de 4cm em x e 4cm em y e uma escala de 4cm. Obteve-se igualmente um resultado regular e coerente.

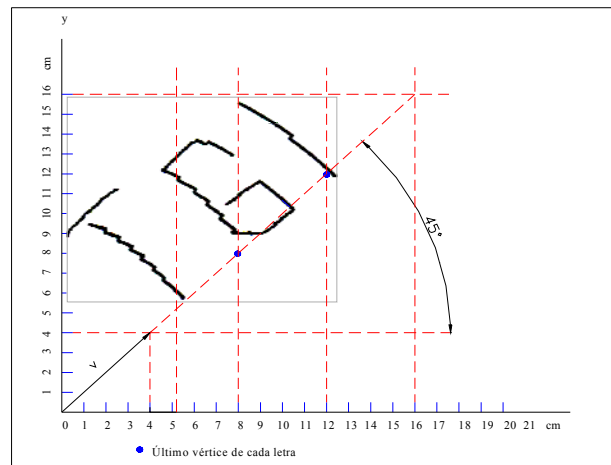


Figura 13 - Resultado da palavra “TGI”, com ângulo de rotação de 45° , escala de 4cm e translação de 4cm em x e 4cm em y

Resultado semelhante pode ser observado na palavra “NOTA”, mostrada na Figura 14, onde empregou-se o ângulo de rotação em -45° , translação em x de 6cm e em y de 10cm e escala de 4cm.

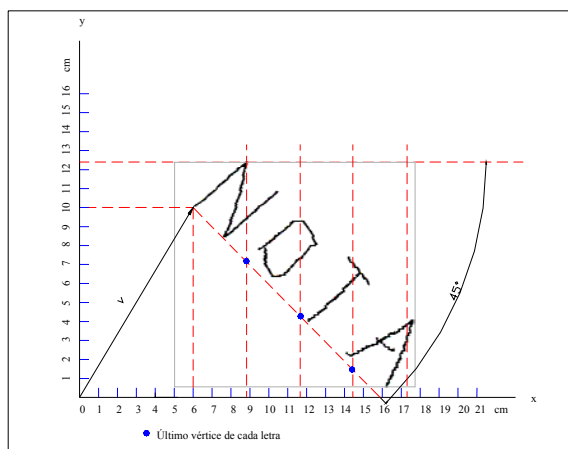


Figura 14 - Resultado da palavra “NOTA”, com ângulo de rotação de -45° , escala de 4 cm e translação de 6 cm em x e 10 cm em y

Devido às folgas das engrenagens, das oscilações do braço robótico e dos incrementos visíveis dos passos, nota-se nas figuras geradas que as letras não possuem suavidade em suas formas, e tão pouco concluíram o formato desejado. Certamente o problema não se encontra no cálculo efetuado pelo programa já que na simulação do código no Matlab foi possível verificar que os ângulos obtidos orientaram o braço robótico a posicionar o órgão terminal no ponto desejado.

5 - Conclusão

Implementou-se neste trabalho um braço mecânico robótico de dois graus de liberdade de baixo custo com propósito didático e fácil de ser reproduzido. O braço é comandado e controlado por um microcomputador através da porta paralela.

Desenvolveu-se também uma interface eletrônica de potência para transmitir os comandos do microcomputador para os motores de passo que, junto com redutores são empregados como acionamentos dos elos.

O braço foi aplicado na escrita de palavras num papel com uso de uma caneta adaptada à extremidade e acionada por um eletroímã. Foi desenvolvido um programa de controle e comando dos motores, que também é responsável pela cinemática inversa e a escrita das letras. As coordenadas dos vértices das letras do alfabeto foram geradas e armazenadas no código do programa.

Observando os resultados obtidos com manipulação do braço, percebe-se que algumas letras não tiveram uma forma completa, como por exemplo as letras *A* e *R* (Figuras 10 e 11), devido às folgas nas engrenagens, que ocasionam oscilações do braço robótico. Contudo, os resultados obtidos foram satisfatórios, em razão da estrutura física ter sido feita artesanalmente e com reaproveitamento de materiais já utilizados.

Algumas melhorias podem, contudo ser efetuadas, como no circuito de acionamento dos motores de passos, por exemplo, o qual pode ser implementado em modo de meio passo, para aumentar a precisão e resolução. Pode-se também utilizar um conjunto de engrenagens de metal, que apresentam folgas menores do que as engrenagens de plástico usadas neste trabalho. O programa pode também ser melhorado pela inclusão de controle por trajetória ao contrário do controle por pontos utilizado nesta versão. Com um controle por trajetória seriam gerados pontos ao longo da reta que une dois vértices sucessivos da letra, de tal forma que a distância entre estes pontos seja de apenas alguns passos. Com este procedimento seriam evitadas as trajetórias curvas apresentadas por algumas letras, como as linhas verticais do *T*, *G* e *I* da Figura 13.

Bibliografia

Livros Consultados:

Azevedo, E.; Conci, A. *Computação gráfica. Teoria e prática*. Editora Elsevier, Rio de Janeiro, 2003.

Groover, M. P.; Weiss, M.; Nagel, R. N.; Odrey, N. G. *Robótica. Tecnologia e Programação*. McGraw-Hill, São Paulo, 1989.

Watt, A. *3D Computer graphics*. Harlow, England. Addison-Wesley, 1997

Site Consultado:

<http://www.cs.uiowa.edu/~jones/step/types.html> Douglas W. Jones THE UNIVERSITY OF IOWA Department of Computer Science