

INDUÇÃO DE MOVIMENTO PERMANENTE EM UM SISTEMA SUB-ATUADO DE DOIS GRAUS DE LIBERDADE

Aluno: Luis Pedro Ramalho Junior

Orientador: Hans Ingo Weber

Introdução

Em robótica, entende-se por sistema sub-atuado aquele que possui um número maior de graus de liberdade do que atuadores. Uma importante característica desses sistemas é a maior eficiência, uma vez que utiliza menos motores que o habitual.

Uma aplicação desses sistemas, ainda não muito estudada, é a da indução do movimento permanente, isto é, impor um movimento contínuo no elemento sub-atuado a partir do movimento de um componente atuador. Em nosso estudo procura-se induzir um movimento de rotação com velocidades angulares constantes no elemento sub-atuado a partir de um movimento oscilatório prescrito no componente atuador.

A aplicação prática idealizada neste estudo encontra-se na geração de energia elétrica a partir das ondas do mar. Neste caso, seria possível induzir um regime de rotação contínua a partir do movimento oscilatório das ondas marítimas, estabilizando o regime de rotação constante quando as ondas estiverem irregulares ou com amplitude insuficiente para manter a rotação do elemento sub-atuado.

Objetivos

O Objetivo deste trabalho consiste no desenvolvimento e aplicação de um sistema sub-atuado. O sistema sub-atuado em questão é composto de um manipulador planar com o intuito de induzir movimento permanente.

Este estudo inicia-se com a modelagem e a determinação da dinâmica do sistema, a seguir, determina-se sua dinâmica inversa, de forma a alimentar um possível sistema de controle para o mesmo. Com isto já é possível gerar uma simulação do sistema, bem como comparar seus resultados com a análise experimental, e assim validar o modelo numérico.

Motivação

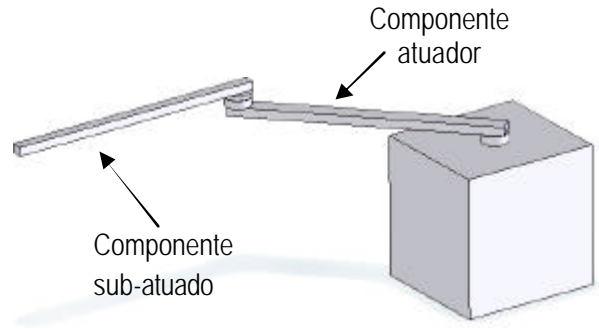
Sistemas sub-atuados possuem diversas aplicações úteis teóricas, porém suas aplicações práticas ainda não são plenamente visíveis. Com esse tipo de sistemas pode-se sobrepor o controle tradicional de sistemas não sub-atuados quando estes apresentarem falha, transformando-se em sistemas sub-atuados com funcionalidade igual ou muito semelhante ao original. Uma aplicação possível ainda não estudada nesta área seria na geração de energia elétrica por ondas marítimas, onde estas induziriam uma rotação no componente sub-atuado, esta rotação seria responsável pela geração da energia elétrica, porém como o mar trata-se de um ambiente imprevisível e sujeito a diversas variáveis, esta rotação não se manteria constante, dentro de limites necessários para geração de energia e manutenção do movimento.

Sumário

INTRODUÇÃO	1
OBJETIVOS.....	1
MOTIVAÇÃO.....	1
SUMÁRIO	2
CONCEITOS BÁSICOS DO MANIPULADOR	3
MODELAGEM MATEMÁTICA	3
MODELAGEM DA DINÂMICA INVERSA	4
SIMULAÇÕES	4
PROTÓTIPO	6
CONSTRUÇÃO INICIAL.....	6
INÍCIO DO MOVIMENTO PERMANENTE.....	8
CONTROLE	8
CONCLUSÕES	9
REFERÊNCIAS	10

Conceitos Básicos do Manipulador

Um manipulador consiste de um sistema articulado com um ou mais graus de liberdade, mais comumente visto com no mínimo dois graus de liberdade, é amplamente estudado e seu uso na área de automação e robótica já é dominado. Quando levamos em consideração um manipulador planar, significa que sua liberdade está restrita a um plano horizontal, ou seja, se houver gravidade, esta não interferirá em seus movimentos de forma alguma.



O manipulador planar estudado pode ser comparado a um pêndulo duplo, apenas alterando sua orientação passando de vertical para horizontal.

Os pêndulos duplos são bastante estudados, bem como o seu controle, porém seu uso, até o momento, é basicamente didático. Ao se alterar sua orientação transformando-o num manipulador planar com dois graus de liberdade, seu uso e aplicações são diferenciados.

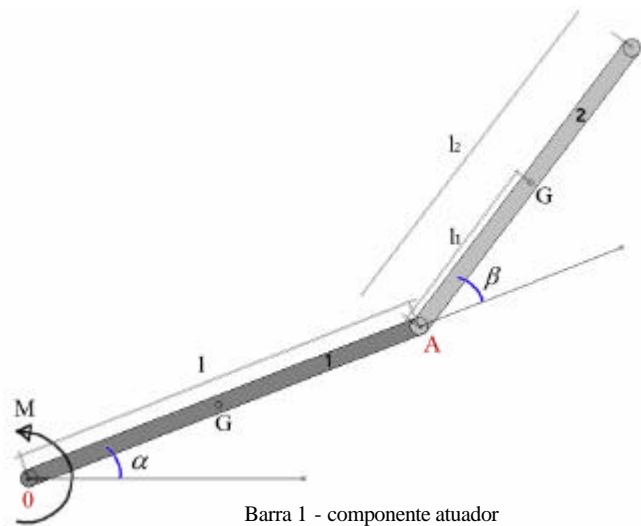
Manipuladores equivalentes ao sistema de pêndulo (com apenas um atuador, e dois graus de liberdade) podem possuir diversas variações estruturais, alterando sensivelmente o comportamento do sistema, pode-se manter o atuador horizontalmente e o sub-atuado verticalmente (pêndulo rotacional invertido), ou substituir o componente sub-atuado por uma roda atuada, e o componente originalmente atuado se transforma no sub-atuado, transformando-se num pêndulo de roda inercial.

Modelagem Matemática

A modelagem matemática do manipulador planar é fundamental para qualquer tipo de estudo que envolva seu comportamento dinâmico, o manipulador utilizado possui uma dinâmica simples e com equacionamento bastante encontrado na literatura, porém, por questões didáticas e de confirmação de resultados, foi resolvido modelar o sistema desde o princípio, sem influência dos dados encontrados na literatura.

A determinação da dinâmica foi realizada tanto a partir das equações de Newton-Euler quanto pelas equações de Lagrange. A utilização das duas abordagens distintas foi realizada de forma a verificar qual modelagem seria de mais fácil implementação computacional.

A abordagem que se mostrou mais simples foi por Newton-Euler, de onde foram obtidas as equações a seguir:



Barra 1 - componente atuador
Barra 2 - componente sub-atuado

$$(a + \cos b) \cdot \ddot{a} + \cos b \cdot \ddot{b} - (\dot{a} + \dot{b})^2 \sin b = \frac{M}{m_2 l l_1}$$

$$(c + \cos b) \cdot \ddot{a} + c \cdot \ddot{b} + \dot{a}^2 \sin b = 0$$

Os termos a e c da equação acima são:

$$a = \frac{I_0^{(1)} + m_2 l^2}{m_2 l_1}; c = \frac{I_A^{(2)}}{m_2 l_1}$$

$I_0^{(1)}$ = momentode inércia da barra 1 em relação ao ponto 0

$I_A^{(2)}$ = momentode inércia da barra 2 em relação ao ponto A

Modelagem da Dinâmica Inversa

Numa segunda fase do projeto, faz-se necessária a determinação da dinâmica inversa do sistema, de forma a obter o comportamento necessário do elemento atuador para induzir ao componente sub-atuado o movimento contínuo.

Alguns parâmetros foram definidos como condição inicial para se chegar a conclusões na dinâmica inversa, tais como velocidade angular do componente sub-atuado constante e aceleração nula. Com essas variáveis colocamos o sistema em um estado no qual o componente sub-atuado já realiza um movimento de rotação.

Com o desenvolvimento da equação de dinâmica inversa, foi obtido o seguinte resultado:

$$\dot{\mathbf{a}} = \frac{1}{C - \ln|c + \cos \omega t|}$$

Esta equação define as velocidades angulares necessárias para manter o componente sub-atuado em movimento permanente. C é uma constante de integração, com as considerações já feitas a respeito dos parâmetros e trabalhando os termos da equação obtida, chega-se a conclusão que C é um termo ligado diretamente a $\dot{\mathbf{a}}_0$ (velocidade inicial de rotação do elemento atuado).

O mesmo equacionamento para encontrar $\dot{\mathbf{a}}$ é usado para se obter $\ddot{\mathbf{a}}$:

$$\ddot{\mathbf{a}} = -\frac{\sin \omega t \cdot \dot{\mathbf{a}}^2}{c + \cos \omega t}$$

Tendo ambas equações é possível fazer uma substituição na equação da dinâmica do elemento (em sua parte atuada), com isso chegamos a:

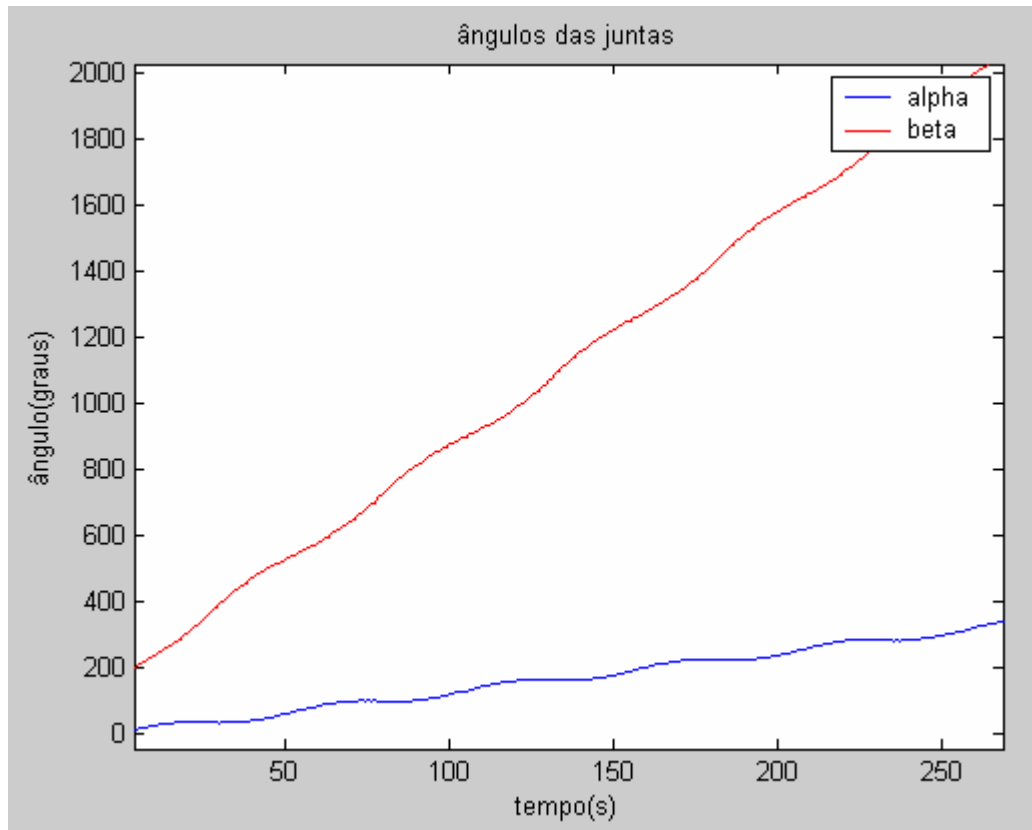
$$\bar{M} = -(a + \cos \omega t) \frac{\sin \omega t}{c + \cos \omega t} \cdot \left[\frac{1}{C - \ln|c + \cos \omega t|} \right]^2 - \left(\left[\frac{1}{C - \ln|c + \cos \omega t|} \right] + \omega^2 \right) \sin \omega t$$

Que deve ser interpretado como o momento necessário para realizar o movimento com ωt constante com um valor de $\dot{\mathbf{a}}_0$, definido.

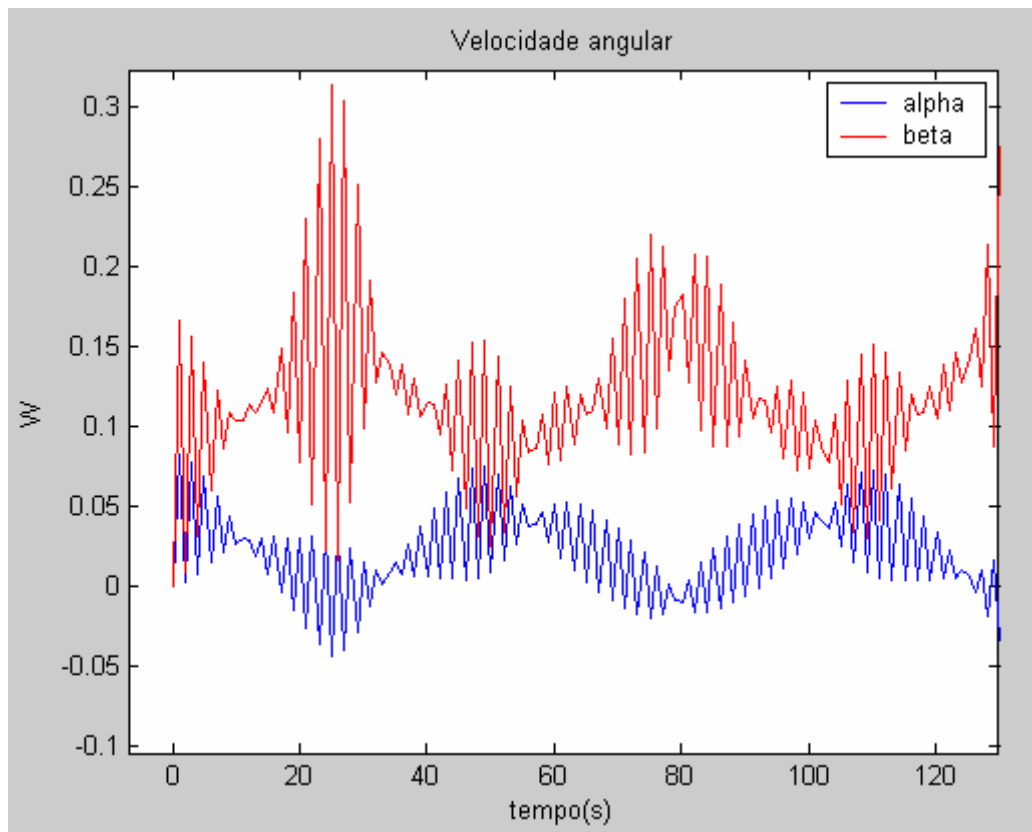
Simulações

Com as equações de movimento foi possível realizar simulações numéricas, utilizando a plataforma MatLab. Estas simulações não englobam a malha de controle, com o objetivo apenas de melhor entender o fenômeno físico.

A seguir, alguns gráficos obtidos em situações específicas:

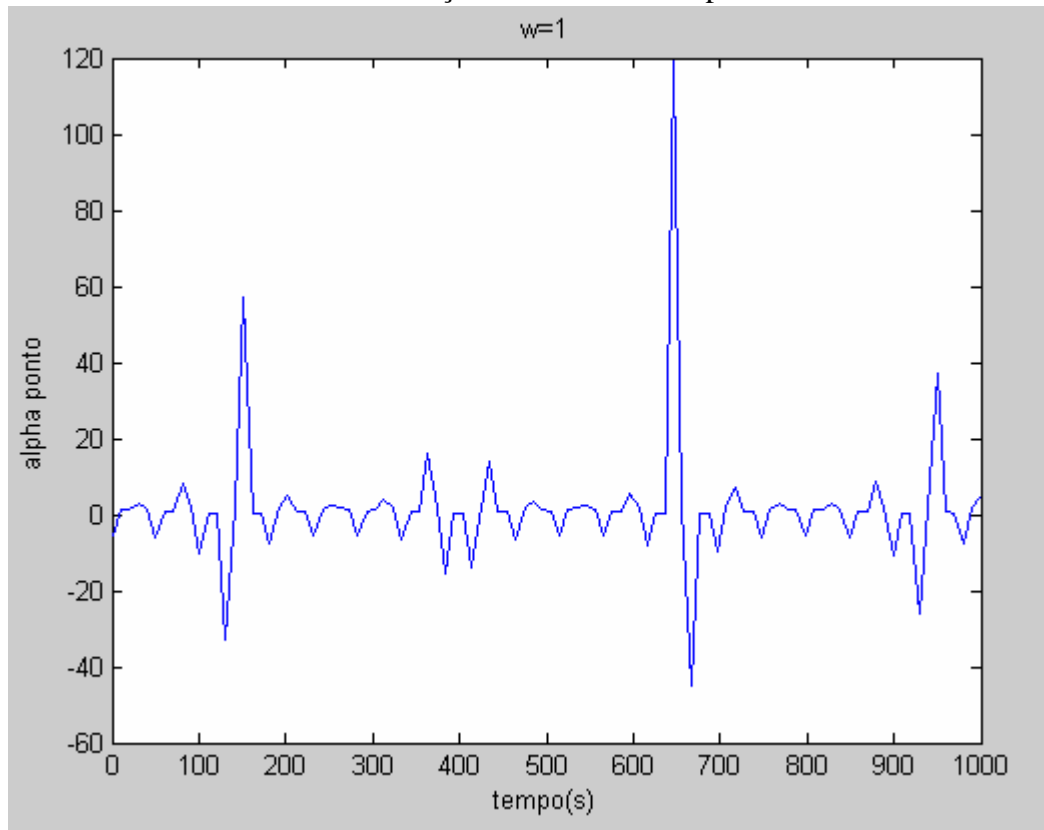


O valor de Beta cresce constantemente, demonstrando que o movimento rotacional é contínuo, com apenas uma pequena oscilação.



O comportamento do sistema é periódico, com aplicação de um momento senoidal constante e condições iniciais satisfazendo as necessárias para a dedução da dinâmica inversa.

Uma vez finalizada a dinâmica inversa, simula-se numericamente o sistema (plataforma MatLab). A partir desta simulação foi possível determinar o movimento prescrito do atuador de forma a induzir o movimento de rotação contínua no componente sub-atuado:



Alpha ponto possui comportamento quase periódico, com imperfeições durante a simulação, porém testes e simulações com ondas senoidais e quadráticas como entrada deram resultados muito satisfatórios.

Outra simulação realizada em Visual Nastran pode ser usada para comparação dos resultados com MatLab, uma vez que a simulação neste programa utiliza dados físicos dimensionais do manipulador.

Protótipo

Construção Inicial

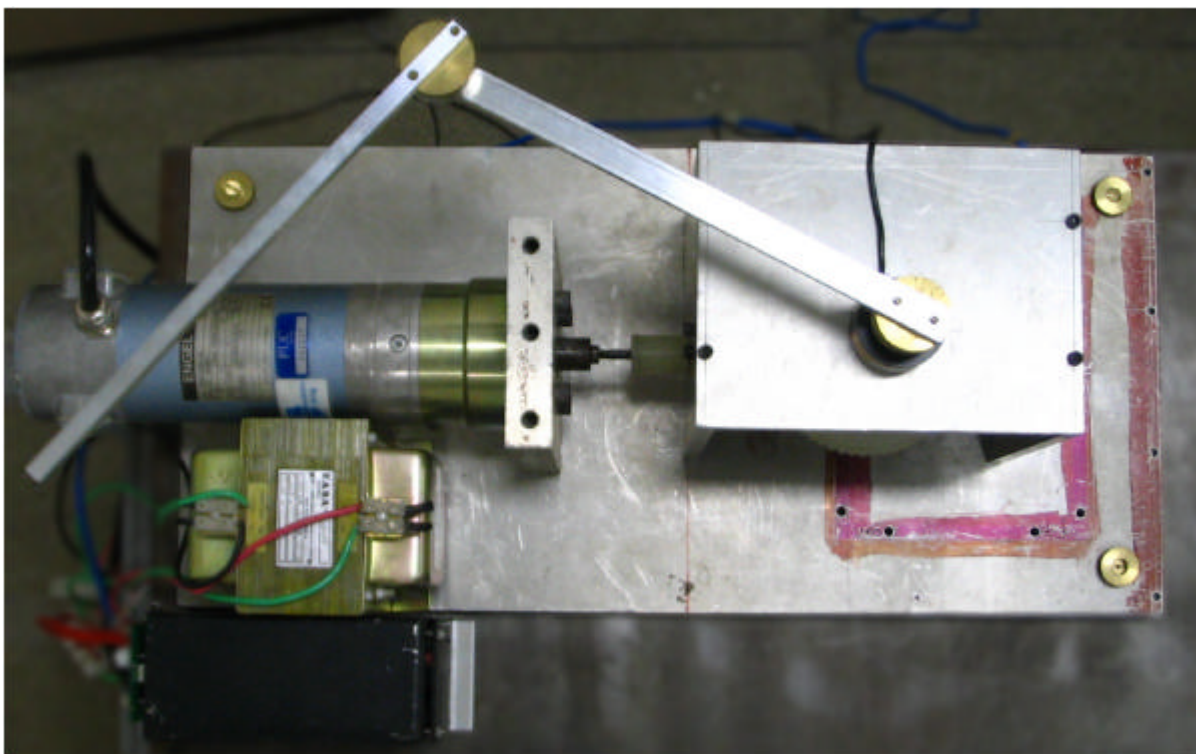
Simultaneamente com todo o desenvolvimento matemático, uma bancada experimental foi concebida e construída, de forma a validar o modelo numérico.

Uma vez que a dinâmica desenvolvida não leva em consideração efeitos de atrito, a bancada foi concebida de forma a minimizar tais efeitos (por exemplo, uso de materiais leves e rolamentos de excelente qualidade).

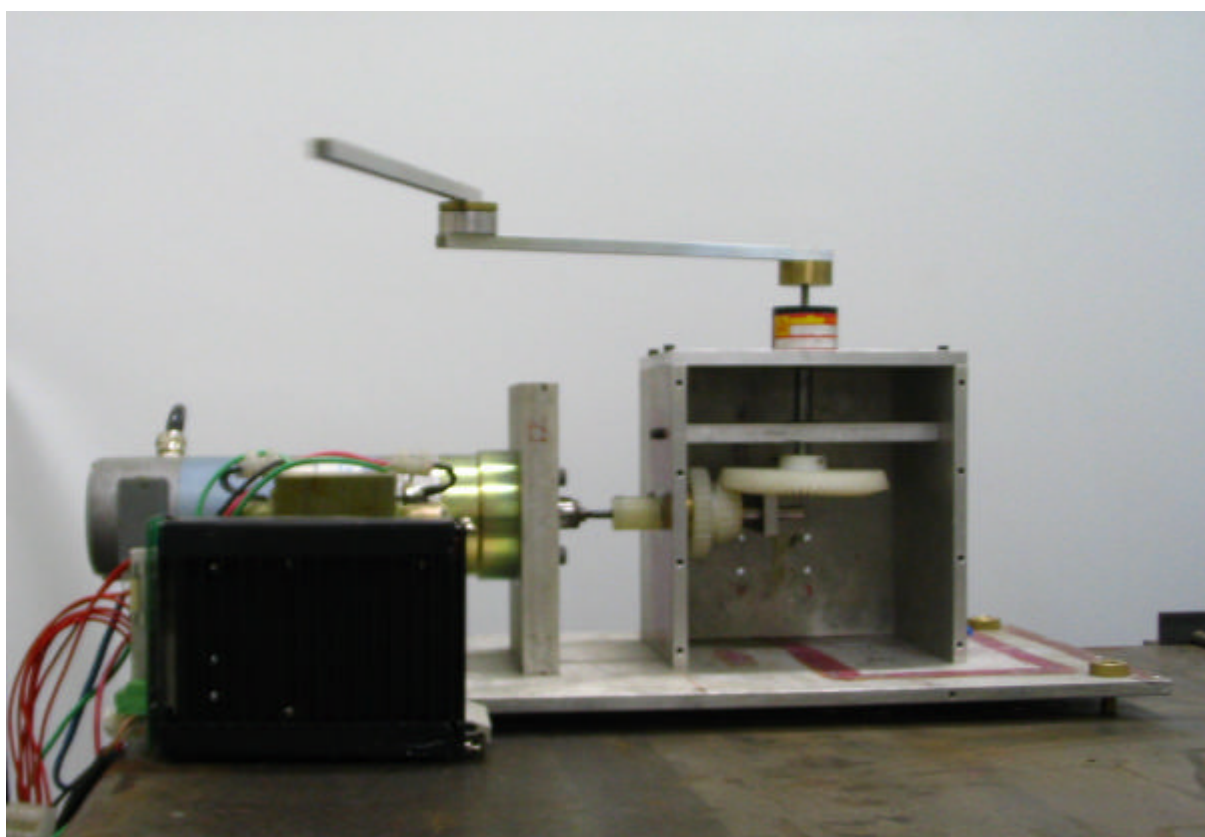
Com a bancada experimental finalizada, foi acoplado ao componente atuador um motor PWM (pulse width modulation ou modulação por largura de pulso) com um módulo de controle por tensão, e a transmissão de movimento é realizada por um sistema de engrenagens.

No eixo ligado diretamente ao componente atuador, foi fixado um *encoder*, este dispositivo fornecerá informações de posição e velocidade ao sistema de controle.

Algumas alterações foram necessárias na construção da bancada, como mudança na redução no sistema de engrenagens, colocação de dispositivos para nivelamento da bancada, ajustes nas hastes e engate com o motor com o mínimo de folga.



Vista superior do protótipo em sua versão atual



Vista frontal do protótipo em sua versão atual.

Início do Movimento Permanente

Sabendo-se, pelas simulações numéricas, que para induzir o movimento contínuo do componente sub-atuado, o movimento do componente atuador deve ser periódico, foram realizados testes preliminares na bancada experimental. Estes testes consistem na aplicação, através de um gerador de sinais, de ondas quadradas e senoidais ao módulo de controle do motor, de forma que o componente atuador descreva um movimento periódico, e assim observar o comportamento do componente sub-atuado. A observação do movimento do componente sub-atuado foi utilizada para validar o modelo numérico, pois o comportamento foi muito próximo do esperado.

Controle

Para que o sistema funcione corretamente, com a movimentação desejada obtida na simulação da dinâmica inversa no MatLAB, devemos aplicar uma malha de controle, inicialmente esta malha seguirá um padrão simples, partindo depois para sistemas PID ou mais eficientes para a situação

O controle proposto foi montado em LabVIEW, utilizando como única entrada de realimentação o *encoder* localizado no elemento atuador,

Sem o controle, o sinal de entrada desejado poderia ser enviado ao motor, porém não haveria garantias de que ele estaria realizando o movimento desejado, pois o sinal deve ser corrigido para o motor em cada instante do movimento.

De forma a eliminar o problema da aplicação de condições iniciais não nulas ao sistema, faz-se necessário projetar o sistema de controle em duas fases: uma para gerar estas condições iniciais e outra para prescrever o movimento periódico do atuador, de forma a manter o componente sub-atuado com movimento permanente.

A conexão física utilizada entre o computador e o motor *PWM*, é uma interface de entrada e saída de dados da *National Instruments*, esse sistema pode ser utilizado diretamente com o software *LabVIEW*.

Uma importante observação a ser feita no sistema, é que por não existir *encoder* no elemento sub-atuado, não há informação de sua posição, logo ao iniciar o movimento precisamos garantir que o elemento esteja em uma posição conhecida, por isso o controle ao ser ativado, inicia-se em um modo de rotação constante do elemento atuador, manter uma rotação constante por um período considerável de tempo garante que o elemento sub-atuado acompanha o mesmo movimento que o elemento atuador.

Após os dois elementos possuírem rotação constante e igual, inicia-se a primeira etapa do controle, onde uma rotação deve ser aplicada ao elemento sub-atuado, após a aplicação desta rotação uma segunda etapa do controle entra em operação iniciando então a indução do movimento rotacional permanente no componente sub-atuado.

Com o funcionamento do sistema, foi possível validar o equacionamento da dinâmica inversa com as considerações de linearização utilizadas.

Conclusões

A validação do modelo numérico com os testes experimentais permitiu uma melhor compreensão do comportamento dinâmico do manipulador. Esta melhor compreensão permitirá experimentar outras modelagens do sistema, tal como linearizar as equações de movimento na condição de regime permanente e buscar soluções alternativas ao problema.

Mesmo com a utilização de um gerador de sinais sem qualquer tipo de realimentação foi possível obter resultados bastante estáveis, porém dentro de certas limitações de parâmetros, como tensão, forma de onda utilizada e frequência, o que nos ajuda a escolher uma entrada simplificada ao sistema, sem necessidade de geração de sinais complexos.

A indução do movimento contínuo no componente sub-atuado a partir de um movimento prescrito no componente atuador revelou-se satisfatória numa certa faixa de velocidade angular, não se aplicando para grandes velocidades, pois quanto maior a velocidade angular, maiores serão os atritos do sistema com rolamentos e ar, sendo necessário um ajuste no controle para que seja possível o movimentos nessas situações.

Estudos detalhados ajudarão a estabelecer a faixa de frequência de rotação em que será possível manter o movimento permanente no componente sub-atuado.

Um outro possível estudo compreende na introdução da gravidade no sistema (alterando a inclinação da bancada) e modificando os componentes com adição de massa em pontos específicos.

Referências

- 1 - I. FANTONI, R. LOZANO. **Non linear control for underactuated mechanical systems**, Springer-Verlag London, Communications and Control Engineering Series, 2002, Book review in Automatica 38, 2002, pp 2030-2031.
- 2 - N. SHIROMA, H. ARAI AND K. TANIE **Nonlinear Control of a Planar Free Link Under a Nonholonomic Constraint**, Proc. 8th International Conference on Advanced Robotics (ICAR'97), pp.103-109, 1997.
- 3 - E. DOMBRE, W. KHALIL. **Modélisation et commandes des robots**, Paris, Traite des Nouvelles Technologies, série Robotique, Editions Hermès, 1988.