

# **Relatório Parcial de Atividades**

## **Controle de Estabilização de Caminhada de Robô Humanoide**

**Bolsa de Iniciação Científica 2020/04559-6**

**Período relatado: 01/07/2020 a 10/12/2020**

**Laboratório de Sistemas Computacionais Autônomos**

**Instituto Tecnológico de Aeronáutica – ITA**

**Aluno:** Reynaldo Santos de Lima

**Orientador:** Marcos Ricardo Omena de Albuquerque Maximo

**6 de dezembro de 2020**

### **Resumo**

Neste trabalho estudam-se adaptações em algoritmos de estabilização de caminhada em robô humanoide de baixo custo (ITAndroids Chape 1<sup>a</sup> e 2<sup>a</sup> gerações). Esse trabalho será realizado no Laboratório de Sistemas Computacionais Autônomos (LAB-SCA), onde existe um estudo de caminhada de robôs humanoide. São apresentados aspectos importantes do modelo em baixo nível do controle, com a equação do manipulador. Dá-se destaque a termos de inércia que comumente são omitidos na literatura e que são relevantes para a aplicação de robôs humanoides. Estudam-se, ainda, métodos de otimização e suas aplicações. O código já utilizado serve como ponto de estudo, com o objetivo de encontrar possíveis otimizações como também de adaptá-lo para o robô Chape 2<sup>a</sup> geração.

**Palavras chaves:** Caminhada de robôs humanoides, Controle, Robótica.

# Sumário

<b>1</b>	<b>Resumo do plano inicial</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Resumo das etapas realizadas</b>	<b>4</b>
<b>3</b>	<b>Estudo do movimento de servomotores de posição</b>	<b>4</b>
3.1	Equação do manipulador . . . . .	5
3.2	Extensão do modelo para um robô humanoide . . . . .	7
3.3	Compensador de orientação do torso . . . . .	8
<b>4</b>	<b>Algoritmos de otimização</b>	<b>8</b>
4.1	Uso do algoritmo simplex . . . . .	10
4.2	Aplicação em malha de corrente . . . . .	10
<b>5</b>	<b>Plano de trabalho e cronograma para as etapas seguintes</b>	<b>11</b>

# 1 Resumo do plano inicial

O plano inicial, do trabalho de 12 meses, com início em julho de 2020, dividido em execução nas atividades listadas a seguir:

- A Estudo introdutório a matéria de controle;
- B Estudo sobre algoritmos de otimização;
- C Estudo sobre a caminhada do robô humanoide;
- D Estudo detalhado do código do robô humanoide relacionado ao seu caminhar, organização do código e início dos planos de otimização;
- E Confecção do primeiro relatório científico;
- F Continuação do processo de otimização;
- G Testes no robô real seguidos de aquisição de dados;
- H Fim do processo de otimização seguido da comparação de resultados do antes e pós processo de modificação e otimização;
- I Implementação definitiva do novo código;
- J Ajuste na malha de controle para melhor desempenho;
- K Confecção do segundo relatório científico.

Tabela 1: Cronograma de atividades detalhado.

Bimestre	Atividade										
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1											
2											
3											
4											
5											
6											

## 2 Resumo das etapas realizadas

Até o momento, foram realizadas as seguintes atividades:

- A Estudo introdutório a matéria de controle;
- B Estudo sobre algoritmos de otimização;
- C Estudo sobre a caminhada do robô humanoide;
- D Estudo detalhado do código do robô humanoide relacionado ao seu caminhar, organização do código e início dos planos de otimização;
- E Confecção do primeiro relatório científico.

Vale ressaltar que o item D foi apenas iniciado, com o processo de instalação do código e do simulador, faltando estudar o código em profundidade para iniciar os planos de otimização.

## 3 Estudo do movimento de servomotores de posição

Usualmente, no controle em alto nível, usa-se o modelo do pêndulo invertido com o centro de massa do robô [1], de modo a simplificar a previsão do movimento. Por outro lado, em malhas a mais baixo nível, utilizam-se modelos mais fiéis, considerando cada membro do robô como um manipulador. Com os diversos servomotores distribuídos nas juntas, surgem efeitos inerciais por gravidade e força de coriolis.

Na consideração dos movimentos relativos, usualmente na literatura e em simuladores (como no Gazebo, que utilizar-se-á na pesquisa) adota-se um modelo simplificado, que ignora um termo de primeira ordem na transferência do motor em juntas móveis (razão da velocidade angular de entrada com a de saída, referente ao conjunto de engrenagens em cada motor), que, na aplicação de robôs humanoide, pode ser uma aproximação inadequada.

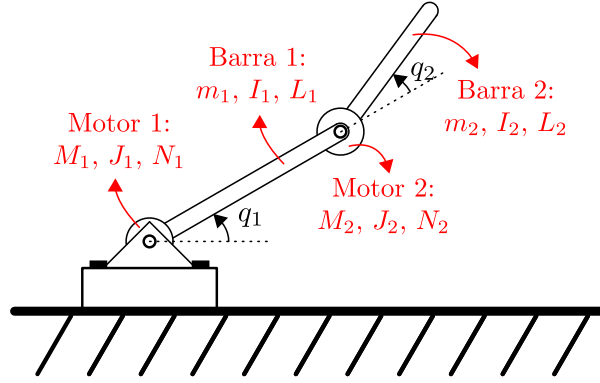


Figura 1: Representação do sistema de servomotores com dois braços, no caso plano.

Por esse motivo, buscou-se estudar a dedução completa da equação do manipulador, de modo a entender como melhor simular o movimento do robô, ou prever as discrepâncias do modelo simulado com o robô real.

### 3.1 Equação do manipulador

Estudando-se o caso plano da conexão de dois braços mecânicos, com motores em cada uma de suas juntas, é possível observar a dependência em primeira ordem da redução do segundo motor (que está em base acelerada). A dedução para o caso geral em três dimensões, estendido para um número qualquer de braços, pode ser visto em [2].

Um esquema do caso estudado para este relatório, o qual já corretamente representa a situação nas juntas de robôs humanoides, pode ser visto na figura 1. Nela,  $M_i$ ,  $J_i$ ,  $N_i$ ,  $m_i$ ,  $I_i$  e  $L_i$ , referem-se, respectivamente, à massa do motor  $i$ , momento de inércia do motor  $i$ , razão de transferência do motor  $i$ , massa da barra  $i$ , momento de inércia da barra  $i$  em relação ao eixo passando pelo seu centro de massa e comprimento da barra  $i$ , para  $i = 1, 2$ . Considerando as barras homogêneas, adota-se a relação em .

$$I_i = \frac{m_i L_i^2}{12}. \quad (1)$$

Inicialmente, observa-se que, para a modelagem, convém usar as equações de Euler-Lagrange, técnica comum na literatura de manipuladores [3]. Como marcado na figura 1,

as coordenadas generalizadas adotadas serão os ângulos relativos a linha de base anterior,  $q_1$  e  $q_2$ .

Tomando os momentos de inércia das barras nos eixos em seu centro de massa, faz-se necessário descrever a velocidade do centro de massa da barra 2 (as velocidades dos demais elementos são imediatas), descrito em 2, em que  $\vec{v}_{G_2}$  é a velocidade do centro de massa da barra 2,  $V_{M_2}$  é a velocidade do motor 2,  $\vec{k}$  é o vetor unitário normal ao plano e  $\vec{r}_2$  é o vetor unitário na direção da barra 2. Com isso, é possível calcular a energia cinética de cada elemento por (3), em que  $m^{CM}$  e  $I^{CM}$  são, respectivamente, a massa e momento de inércia dos centros de massa de elementos quaisquer e  $\omega$  e  $v^{CM}$  são, em ordem, a velocidade angular e linear no centro de massa em relação ao solo. A energia cinética total a soma da energia cinética em cada elemento.

$$\vec{v}_{G_2} = v_{M_2} + \frac{L_2}{2}(\dot{q}_1 + \dot{q}_2)(\vec{k} \times \vec{r}_2). \quad (2)$$

$$T_i = \frac{I^{CM}(\omega)^2}{2} + \frac{m^{CM}(v^{CM})^2}{2}. \quad (3)$$

As energias cinética e potencial, representadas em (4) e (5), sendo  $g$  a aceleração da gravidade, respectivamente, geram  $L = T - V$ . Das relações em(6), ignorando atritos, obtém-se, por fim, as equações dinâmicas do conjunto de servomotores.

$$T = \frac{J_1 N_1^2 \dot{q}_1^2}{2} + \frac{m_1}{2} \left( \frac{\dot{q}_1 L_1}{2} \right)^2 + \frac{1}{2} \frac{m_1 L_1^2 \dot{q}_1^2}{12} + \frac{M_2 \dot{q}_2^2 L_1^2}{2} + \frac{J_2 (N_2 \dot{q}_2 + \dot{q}_1)}{2} + \frac{m_2 \dot{q}_1^2 L_1^2}{2} + \frac{m_2 (\dot{q}_1 + \dot{q}_2)^2 L_2^2}{6} + \frac{m_2 \dot{q}_1 (\dot{q}_1 + \dot{q}_2)}{2} L_1 L_2 \cos q_2. \quad (4)$$

$$V = m_1 g \frac{L_1}{2} \sin q_1 + M_2 g L_1 \sin q_1 + m_2 g \left[ L_1 \sin q_1 + \frac{L_2}{2} \sin(q_1 + q_2) \right]. \quad (5)$$

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_i} = 0, i = 1, 2. \quad (6)$$

Finalmente, obtém-se as equações do sistema dinâmico, em função de  $q = [q_1 q_2]^T$ , desconsiderando atritos ou entradas de torque, em (7). Na matriz  $\mathcal{J}$ , em (9), estão destacados os termos que motivam esta dedução, que introduzem inércia em primeira ordem em  $N_2$ . Na literatura, com algumas excessões encontradas pelos autores [2], [4], costuma-se desprezar estes termos, frente aos termos quadráticos de  $N_1$  e  $N_2$ . Para diversas aplicações, como a do controle de caminhada, pode haver influência considerável destes termos [2], o que motiva este estudo.

$$B(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + g(q) = 0, \quad (7)$$

em que:

$$B(q) = \begin{bmatrix} \frac{m_1 L_1^2 + m_2 L_2^2}{3} + m_2 L_1^2 + m_2 L_1 L_2 \cos q_2 & \frac{m_2 L_2^2}{3} + \frac{m_2 L_1 L_2 \cos q_2}{2} \\ \frac{m_2 L_2^2}{3} + \frac{m_2 L_1 L_2 \cos q_2}{2} & \frac{m_2 L_2^2}{3} \end{bmatrix} + \mathcal{J}, \quad (8)$$

$$\mathcal{J} = \begin{bmatrix} M_2 L_1^2 + J_2 + J_1 N_1^2 & \textcolor{red}{J_2 N_2} \\ \textcolor{red}{J_2 N_2} & J_2 N_2^2 \end{bmatrix}, \quad (9)$$

$$C(q, \dot{q}) = m_2 L_1 L_2 \sin q_2 \begin{bmatrix} -\dot{q}_2 & -1/2 \dot{q}_2 \\ 1/2 \dot{q}_1 & 0 \end{bmatrix}, \quad (10)$$

$$g(q) = g \begin{bmatrix} m_1 \frac{L_1}{2} \cos q_1 + m_2 \left( L_1 \cos q_1 + \frac{L_2}{2} \cos(q_1 + q_2) \right) + M_2 L_1 \cos q_1 \\ m_2 \frac{L_2}{2} \cos(q_1 + q_2) \end{bmatrix}. \quad (11)$$

### 3.2 Extensão do modelo para um robô humanoide

Embora a dedução tenha sido feita para apenas dois membros, é possível estender o modelo para o robô como um todo. Utiliza-se esta modelagem para uma malha de controle em baixo nível com ganhos constantes, de modo que não se faz necessário resolver o problema a tempo de iteração.

### 3.3 Compensador de orientação do torso

Como mencionado, a malha de controle da caminhada costuma ser dividida em níveis. No presente projeto, o estudo da equação do manipulador será utilizado para o projeto de um compensador da orientação do torso, marcado em vermelho na figura 2, adaptada de [5], da malha de controle da caminhada. Trata-se de um controlador P-V, proporcional

A malha de controle do primeiro robô Chape, do LAB-SCA, levou em consideração correções feitas por testes, referente a falha na utilização do modelo de simulador Gazebo para a aplicação de redução nos motores, pois, como mencionado, este, por padrão, ignora o termo linear da razão de redução.

Assim, estuda-se esta modelagem como possível candidata a otimização da malha de controle atual e a sua completa aplicação no novo robô humanoide Chape, segunda geração. Uma correta aplicação no projeto simulado e na determinação dos ganhos do controlador deve proporcionar melhor resposta em algumas faixas do movimento.

## 4 Algoritmos de otimização

Com a malha de controle em baixo nível do compensador do torso, faz-se necessário otimizar os ganhos do controlador P+V utilizado. No projeto do robô Chape de segunda geração, será necessário reestudar os ganhos já projetados para o modelo anterior.

Para todas as etapas do controlador, em geral, realizam-se otimizações de modo a minimizar uma função custo do controlador. A função será escolhida segundo métodos já conhecidos, e minimizar a função custo costuma ser o objetivo da otimização. O problema é montado, de forma genérica, na relação (12), em que  $g_i$  e  $h_j$  são as restrições em desigualdade e igualdade que o sistema exige. Uma restrição, por exemplo, pode ser a faixa de atuação dos servomotores de um manipulador com barreiras físicas em seu movimento.



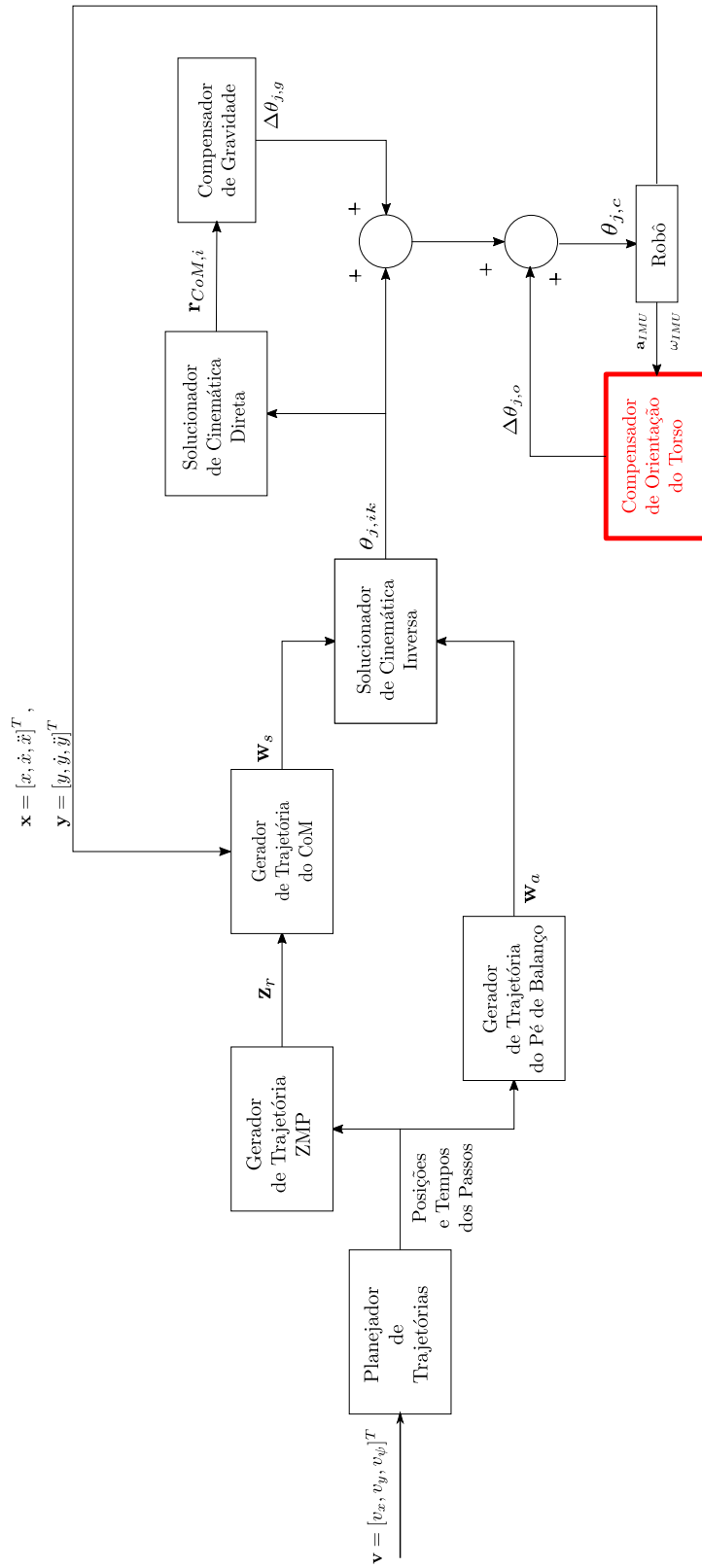


Figura 2: Visão geral do controle de caminhada.

$$\begin{aligned}
& \min_x J(x) \\
& \text{sujeita a: } g_i(x) \leq 0, i = 1, \dots, m. \\
& h_j(x) = 0, j = 1, \dots, p.
\end{aligned} \tag{12}$$

Há diversos algoritmos de minimização de funções, podendo envolver ou não restrições. O escolhido para esta aplicação é o algoritmo simplex, ou Nelder-Mead, que funciona baseado em uma busca por mínimos com a variação de politopos em torno do estado em cada iteração de forma heurística [6].

## 4.1 Uso do algoritmo simplex

A função `fminsearch` utiliza o algoritmo simplex e se mostra adequado para a complexidade das malhas de controle na qual será utilizado. A única ressalva a ser feita é a sua sensibilidade ao ponto inicial  $x_0$  passado. Costuma-se cair em mínimos locais da função custo, dado um  $x_0$  muito longe do ótimo.

Uma estratégia a ser utilizada é a solução de modelos mais simples, que possam ser resolvidos de forma analítica. Havendo o  $x^*$  ótimo para esse problema simplificado, pode-se adotar  $x_0 = x^*$  como chute inicial.

Como já existe uma solução prévia para o problema, no robô Chape. A otimização de um código modificado neste robô ou a implementação do código para a segunda geração Chape já possui um chute inicial dos ganhos P+V utilizados atualmente.

## 4.2 Aplicação em malha de corrente

Para exercitar a aplicação, foi estudado o modelo de um servomotor de posição genérico [7] com malha de corrente. Para a malha de corrente, a ideia era implementar, por meio do método de projetos em frequência, um controlador do tipo Lead combinado em série com um integrador. Foi considerado além da planta o efeito de atraso da discretização e o controle, havendo retorno unitário.

Para isso, inicialmente foi resolvido o problema analítico da planta simplificada. Então, com o ponto original para a otimização, aplicou-se a função `fminsearch` na função de ganho  $J(x)$  apresentada em (13), em que  $K$  representa de forma genérica as constantes do controlador e  $\omega_b^d$  e  $PM^d$  são, respectivamente, a banda passante e a margem de fase desejados no projeto, enquanto  $\omega_b(K)$  é a banda passante para  $K$  atual na iteração e  $PM(K)$ , a fase de margem.

$$J_c(K) = (\omega_b^d - \omega_b(K))^2 + (PM^d - PM(K))^2. \quad (13)$$

A formulação desta função de custo na forma quadrática já foi suficiente para resolver o problema de otimização, indicando que a aplicação no projeto do compensador P+V pode ser feita de forma semelhante. Espera-se maior complexidade visto que o robô humanoide possui mais graus de liberdade, mas a ideia de projeto segue a mesma aplicação.

## 5 Plano de trabalho e cronograma para as etapas seguintes

Seguindo-se as etapas restantes, espera-se focar boa parte do trabalho no período de férias de graduação do aluno, período compreendido de dezembro de 2020 a março de 2021.

Como mencionado, o principal objeto de estudo para otimização estão na malha em baixo nível, dos ganhos obtidos da otimização do controlador P+V do compensador de orientação do torso. O foco do estudo, portanto, será nesses aspectos, iniciando por um estudo a fundo do código atual do robô Chape, da implementação do controle e determinação dos ganhos.

Pretende-se seguir o cronograma e atividades a seguir, com pequenas modificações no foco quanto ao proposto inicialmente:

A Estudo detalhado do código do robô humanoide relacionado ao seu caminhar e

organização do código;

B Continuação do processo de otimização;

C Estudo do modelo implementado do compensador de orientação de torso;

D Testes no robô real seguidos de aquisição de dados;

E Fim do processo de otimização seguido da comparação de resultados do antes e pós processo de modificação e otimização;

F Implementação definitiva do novo código;

G Ajuste na malha de controle para melhor desempenho;

H Confecção do segundo relatório científico.

Tabela 2: Cronograma de atividades futuras.

Mês	Atividade							
	A	B	C	D	E	F	G	H
Dez.								
Jan.								
Fev.								
Mar.								
Abril								
Maio								
Junho								

## Referências

- [1] S. Kajita, F. Kanehiro, K. Kaneko, K. Yokoi e H. Hirukawa, “The 3D Linear Inverted Pendulum Mode: A simple modeling for a biped walking pattern generation”, em *Proc. Int. Conf. Intelligent Robots and Systems*, Maui, EUA, 2001, pp. 239 –246.
- [2] J. Chen, “The effects of gear reduction on robot dynamics”, *JPL, California Inst. of Tech., Proceedings of the NASA Conference on Space Telerobotics*, v. 4, jan. de 1989. DOI: 19900020545.
- [3] . Craig, *Introduction to robotics : mechanics & control / John J. Craig*. Reading, Mass.: Addison-Wesley Pub. Co., 1986, Includes bibliographies and index., ISBN: 0201103265.
- [4] L. Sciavicco, B. Siciliano e V. Luigi, “Lagrange and Newton-Euler dynamic modeling of a gear-driven robot manipulator with inclusion of motor inertia effects”, *Advanced Robotics*, v. 10, pp. 317–334, jan. de 1995. DOI: 10.1163/156855395X00427.
- [5] M. Maximo, “Automatic walking step duration through model predictive control”, Tese de Doutorado, Instituto Tecnológico de Aeronáutica, 2017.
- [6] J. Nocedal e S. J. Wright, *Numerical Optimization*, second. New York, NY, USA: Springer, 2006.
- [7] M. R. O. A. Maximo, C. H. C. Ribeiro e R. J. M. Afonso, “Modeling of a position servo used in robotics applications”, em *Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente*, Porto Alegre, Brasil, 2017.