

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

Período de vigência: 01/07/2020 a 30/06/2021

Instituto Tecnológico de Aeronáutica – ITA

Aluno: Reynaldo Santos de Lima

Orientador: Marcos Ricardo Omena de Albuquerque Maximo
7 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^a e 2^a gerações). Esse trabalho será realizado no Laboratório de Sistemas Computacionais Autônomos (LAB-SCA), onde desenvolvem-se robôs humanoides. 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 sistemas que possuem altas reduções em seus atuadores, como é comum em robôs humanoides acionados por motores elétricos. 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^a geração.

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

Sumário

1	Resumo do plano inicial	3
2	Resumo das etapas realizadas	4
3	Estudo da influência da redução na matriz de inércia	4
3.1	Equação do manipulador	5
3.2	Extensão do modelo para um robô humanoide	8
3.3	Compensador de orientação do torso	8
4	Algoritmos de otimização	10
4.1	Uso do algoritmo simplex	12
4.2	Aplicação em malha de corrente	12
5	Plano de trabalho e cronograma para as etapas seguintes	13

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 da 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 da 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 da influência da redução na matriz de inércia

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 [2], [3].

Na consideração dos movimentos relativos, usualmente na literatura e em simuladores (como no Gazebo [4], que utilizar-se-á na pesquisa) adota-se um modelo simplificado, que ignora os termos de inércia gerado pelos motores, que podem ser particularmente grandes dada a alta razão de redução dos motores (razão da velocidade angular de entrada com a de saída, referente ao conjunto de engrenagens em cada motor). Esta aproximação é inadequada nas aplicações de caminhada humanoide.

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. Esta modelagem é especialmente útil, visto que o robô humanoide pode ser considerado um manipulador completamente atuado se seu *zero moment point* (ZMP) estiver dentro do polígono de suporte. Neste caso, considera-se que o pé do robô está preso no solo.

O ZMP é um conceito popular na literatura de caminhada, sendo o ponto no qual pode-se considerar que as forças de reação devem atuar para equilibrar o mecanismo bípede [5]. Quando o ZMP está dentro do polígono de suporte, este coincide com o centro de pressão da base.

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 da inércia dos motores. A dedução para o caso geral em três dimensões, estendido para um número qualquer de braços, pode ser visto em [6].

Vale ressaltar que, na modelagem do robô humanoide estudado, costuma-se fazer um modelo de duas juntas para o plano coronal do robô e um modelo de três juntas para o plano sagital do robô [7]. Como os fatores a serem expostos já aparecem na modelagem com duas juntas, expõem-se apenas estes resultados. Tem-se ainda que o estudo foi feito para conhecimento, pois na prática, costuma-se deduzir as equações no grupo de pesquisa através de manipulação simbólica usando o MATLAB.

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 do momento de

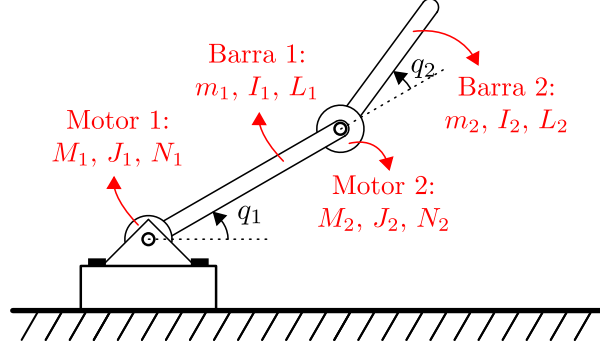


Figura 1: Representação do sistema de servomotores com dois braços, no caso plano.

inércia das barras em (1).

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

Inicialmente, observa-se que, para a modelagem, convém usar as equações de Euler-Lagrange, técnica comum na literatura de manipuladores [2]. Como marcado na Figura 1, as coordenadas generalizadas adotadas serão os ângulos relativos às linhas de base anteriores, 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 e I^{CM} são, respectivamente, a massa e momento de inércia em relação ao centro de massa de um elemento qualquer e ω 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.

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

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

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. As equações (4)-(6) formam o método de Lagrange.

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

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

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

Finalmente, obtém-se as equações do sistema dinâmico, em função de $\mathbf{q} = [q_1 \ q_2]^T$, desconsiderando atritos, sendo \mathcal{T} o torque de entrada, em (7), equação conhecida como a equação do manipulador. Na matriz \mathcal{J} , destacada em vermelho na expressão de $\mathbf{B}(\mathbf{q})$ em (8), em (9), estão destacados os termos que motivam esta dedução, que introduzem inércia, em segunda ordem da redução do primeiro e do segundo motor, termos N_1^2 e N_2 , respectivamente, e em primeira ordem na redução do segundo motor em N_2 . Na literatura, com algumas exceções encontradas pelos autores [6], [8], costuma-se desprezar estes termos, considerando-se apenas a inércia dos braços mecânicos. Há particular importância nos termos de segunda ordem para a faixa de movimento da caminhada [7] e diversas outras aplicações [6], o que motiva este estudo.

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

em que:

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

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

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

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

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. O Chape 1^a Geração conta com duas estratégias principais, conforme evidenciado nos blocos "Compensador de Gravidade" e "Compensador de Orientação de Torso" apresentados na Figura 2. A gravidade cria torques indesejados nas juntas do robô, o que impede que os controladores de posição dos servomotores atinjam suas referências. Entretanto, é possível calcular os valores desses torques usando o modelo de massa do robô e compensá-los através de *feedforward*. O modelo de massa do robô pode ser obtido através de informações de modelos de *computer-aided design* (CAD).

Apesar do compensador de gravidade, ainda surgem erros de orientação do torso. Além de inevitáveis erros no modelo de massa, o que impede uma compensação perfeita da gravidade, efeitos de perturbações (por conta de empurrões e desníveis no solo) e de dinâmica dos atuadores contribuem para erros de orientação.

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 [7], da malha de controle da caminhada.

O compensador de orientação implementado no Chape usa controladores P+V desacoplados para os canais de rolagem e arfagem. Para estimar a orientação do torso, usa-se um filtro de Kalman estendido (EKF) que funde informações do acelerômetro e do girômetro da unidade inercial presente no torso, estratégia implementada em [7]. Ao invés de derivar as estimativas de ângulo, usa-se medidas de velocidade angular do girômetro para evitar amplificação de ruído. As seguintes juntas são consideradas nesse controlador: coxa-arfagem, joelho-arfagem, calcanhar-arfagem, coxa-rolamento e calcanhar-rolagem. Como nosso robô é controlado por posição, o controlador comanda deslocamento de posição:

$$\Delta\theta_{hr,o} = -K_{p,hr}(\phi_d - \phi) - K_{v,hr}p, \quad (12)$$

$$\Delta\theta_{ar,o} = -K_{p,ar}(\phi_d - \phi) - K_{v,ar}p, \quad (13)$$

$$\Delta\theta_{hp,o} = -K_{p,hp}(\theta_d - \theta) - K_{v,hp}q, \quad (14)$$

$$\Delta\theta_{kp,o} = -K_{p,kp}(\theta_d - \theta) - K_{v,kp}q, \quad (15)$$

$$\Delta\theta_{ap,o} = -K_{p,ap}(\theta_d - \theta) - K_{v,ap}q, \quad (16)$$

em que ϕ_d e θ_d são ângulos desejados de rolamento e arfagem, respectivamente; ϕ e θ são ângulos atuais de rolamento e arfagem, respectivamente; p e q são velocidades angulares de rolamento e arfagem, respectivamente; os índices hr , ar , hp , kp e ap referem-se a coxa-rolamento, calcanhar-rolamento, coxa-arfagem, joelho-arfagem e calcanhar-arfagem, respectivamente; $K_{p,*}$ e $K_{v,*}$ representam ganhos proporcionais e derivativos de cada junta, respectivamente; finalmente, $\Delta\theta_{*,o}$ representa o comando de deslocamento (*offset*) de cada junta.

Vale ressaltar que, para determinar os ganhos, lineariza-se o modelo não linear das equações do manipulador em torno de uma postura nominal (robô com velocidade zero no meio da fase de duplo suporte) [7]. A linearização é realizada pelo método de pequenos

sinais [9]. Como exposto, consideram-se dois manipuladores robóticos desacoplados, um para o plano sagital (arfagem) e outro para o plano coronal (rolamento). É projetado um controlador SISO para cada junta de modo a respeitar restrições de interesse (banda passante e margem de fase, discutidas na seção 4.2.

A malha de controle do primeiro robô Chape, do LAB-SCA, foi projetada com base em um modelo matemático para o modelo do simulador Gazebo. Porém, sua transferência para o robô real foi realizado por ajustes manuais devido à falta de tempo. Destaca-se que o modelo de simulação e o robô real atualmente possuem diferenças dinâmicas, como relatado em [7].

Assim, estuda-se esta modelagem como possível candidata à 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 reprojetar 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 (17), em que g_i e h_j são as restrições em desigualdade e igualdade que o sistema exige.

$$\begin{aligned} \min_x J(x) \\ \text{sujeita a: } g_i(x) \leq 0, i = 1, \dots, m. \\ h_j(x) = 0, j = 1, \dots, p. \end{aligned} \tag{17}$$

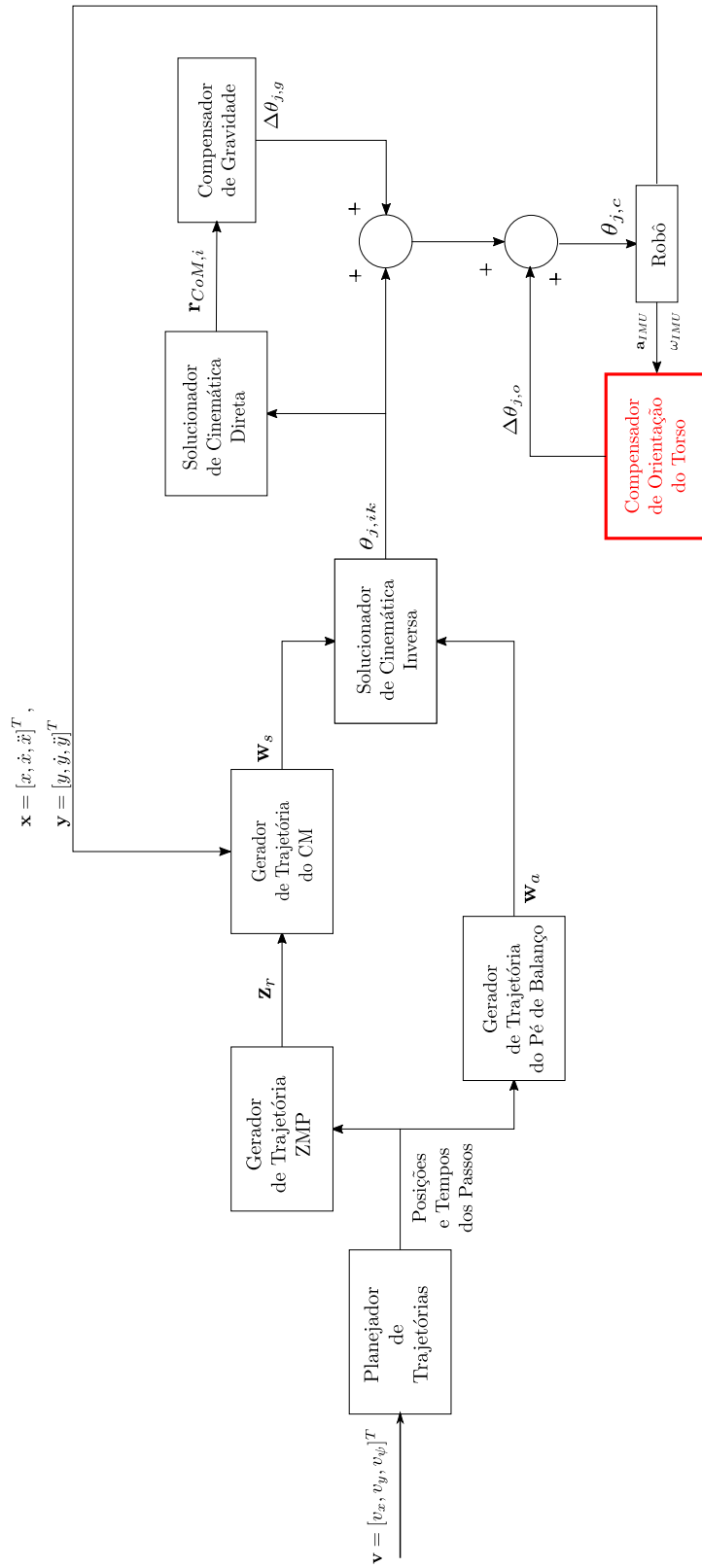


Figura 2: Visão geral do controle de caminhada.

O uso de algoritmos de otimização é necessário, pois o modelo dinâmico linear é complexo, com alta ordem, principalmente se forem considerados os efeitos do atraso introduzido pelo uso de controlador digital. Há diversos algoritmos de minimização de funções, podendo envolver ou não restrições. O escolhido para esta aplicação é o algoritmo simplex, ou Nelder-Mead [10], que funciona baseado em uma busca por mínimos com a variação de politopos em torno do estado em cada iteração de forma heurística [11].

4.1 Uso do algoritmo simplex

A função *fminsearch* do MATLAB 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.

A otimização de um código modificado no primeiro robô Chape ou a implementação do código para a segunda geração Chape terá chute inicial para os ganhos P+V com base em uma simplificação do modelo completo do robô para um sistema de segunda ordem com solução analítica.

4.2 Aplicação em malha de corrente

Para exercitar a aplicação, foi estudado o modelo de um servomotor de posição genérico [12] 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, havendo realimentação unitária.

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 (18), em que K representa de forma genérica as constantes do controlador e ω_b^d e PM^d são, respectivamente, a banda passante (BW) e a margem de fase (PM) desejados no projeto, enquanto $\omega_b(K)$ é a banda passante para K atual na iteração e $PM(K)$, a fase de margem.

Tanto PM como BW são parâmetros comuns na caracterização de sistemas de controle, sendo o primeiro a frequência na qual o ganho (na resposta em frequência) cai para 3 dB em relação ao seu valor na frequência de 0 Hz, enquanto o segundo é a diferença entre a fase do sistema na frequência de corte (definida como a frequência na qual o ganho é 0 dB) e -180° . Costuma-se associar BW com a velocidade de resposta no sistema e PM com o amortecimento e a estabilidade [13].

$$J_c(K) = (\omega_b^d - \omega_b(K))^2 + (PM^d - PM(K))^2. \quad (18)$$

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

Com a pandemia, o Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA) adotou no ano de 2020 ensino a distância, o que intensificou a exigência em novos aspectos e, junto a um cronograma alterado, resultou numa dedicação a iniciação científica com menos intensidade que o esperado, principalmente dado que o período de férias foi reduzido no meio do ano e postergado no final. 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 está 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:

- 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] . Craig, *Introduction to robotics : mechanics & control / John J. Craig*. Reading, Mass.: Addison-Wesley Pub. Co., 1986, Includes bibliographies and index., ISBN: 0201103265.
- [3] B. Siciliano, L. Sciavicco, L. Villani e G. Oriolo, *Robotics: Modelling, Planning and Control*, 1st. Springer Publishing Company, Incorporated, 2008, ISBN: 1846286417.
- [4] N. Koenig e A. Howard, “Design and use paradigms for Gazebo, an open-source multi-robot simulator”, em *2004 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS) (IEEE Cat. No.04CH37566)*, vol. 3, 2004, 2149–2154 vol.3. DOI: 10.1109/IROS.2004.1389727.
- [5] M. Vukobratović e B. Borovac, “Zero-Moment Point – Thirty Five Years of Its Life”, *Int. J. Humanoid Robots*, v. 1, n. 1, pp. 157 –173, 2004.
- [6] 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.
- [7] M. Maximo, “Automatic walking step duration through model predictive control”, Tese de Doutorado, Instituto Tecnológico de Aeronáutica, 2017.
- [8] 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.
- [9] G. F. Franklin, J. D. Powell e A. Emami-Naeini, *Sistemas de Controle para Engenharia*, 6th. Bookman, 2013, ISBN: 978-85-8260-067-2.

- [10] J. Lagarias, M. H. Reeds e P. Wright, “Convergence Properties of the Nelder-Mead Simplex Method in Low Dimensions”, *SIAM Journal of Optimization*, v. 4, n. 1, pp. 112–147, 1998.
- [11] J. Nocedal e S. J. Wright, *Numerical Optimization*, second. New York, NY, USA: Springer, 2006.
- [12] 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.
- [13] K. Ogata, *Modern Control Engineering*, 5th. Prentice Hall, 2010, ISBN: 0-13-615673-8.