

Sistema FIEB



PELO FUTURO DA INOVAÇÃO

CENTRO UNIVERSITÁRIO SENAI CIMATEC

Relatório Parcial

Estudo do Estado da Arte sobre robôs antropomórficos

Apresentada por: Juliana Maria S. de Santana

Orientado por: Prof. Marco Reis, M.Eng.

Novembro de 2021

Juliana Maria S. de Santana

Estudo do Estado da Arte sobre robôs antropomórficos

Salvador
Centro Universitário SENAI CIMATEC
2021

Resumo

Escreva aqui o resumo da dissertação, incluindo os contextos geral e específico, dentro dos quais a pesquisa foi realizada, o objetivo da pesquisa, assunção filosófica, os métodos de pesquisa usados e as possíveis contribuições que o que é proposto pode trazer à sociedade.

Palavras-chave: Palavra-chave 1, Palavra-chave 2, Palavra-chave 3, Palavra-chave 4, Palavra-chave 5

Abstract

Escreva aqui, em inglês, o resumo da dissertação, incluindo os contextos geral e específico, dentro dos quais a pesquisa foi realizada, o objetivo da pesquisa, assunção filosófica, os métodos de pesquisa usados e as possíveis contribuições que o que é proposto pode trazer à sociedade.

Keywords: Keyword 1, Keyword 2, Keyword 3, Keyword 4, Keyword 5

Sumário

1	Introdução	1
1.1	Objetivo	1
1.2	Justificativa	1
2	Metodologia	3
2.1	Método bili	3
2.1.1	Fase 1	3
2.1.2	Fase 2	4
2.1.3	Fase 3	4
2.1.4	Fase 4	4
3	Estudo do estado da arte	5
3.1	Robôs Antropomórficos	5
3.1.1	Definição	5
3.1.2	Componentes principais	5
3.2	Modelos de robôs bípedes	6
3.2.1	Robô NAO	6
3.2.2	Robô DARWIN-OP	7
3.2.3	Robô LOLA	8
3.2.4	Robô HUBO 2	9
3.3	Estudo das funcionalidades e mecanismos	10
3.3.1	Percepção	10
3.3.2	Mecanismos	11
3.3.3	Controle	12
A	Comparativo entre modelos de robôs antropomórficos	15
	Referências	17

Lista de Figuras

2.1	Ciclos do método BILI	3
3.1	Robô NAO	7
3.2	Robô Darwin-OP	8
3.3	Robô LOLA	9
3.4	Robô HUBO 2	10
3.5	Classificação dos sensores	11
3.6	Elementos para o desenvolvimento do controlador de caminhada	12
3.7	Diferentes fases de suporte dos pés durante a locomoção de robôs humanoides	12
3.8	Modelos frequentemente utilizados como representações dos robôs bípedes .	13
3.9	Arquitetura geral do gerador de passos	14
3.10	Visão geral do fluxo de informações do framework de controle de equilíbrio proposto	14

Introdução

De acordo com [Rubio, Valero e Llopis-Albert \(2019\)](#) plataformas móveis podem ser classificadas, quanto ao sistema de locomoção, como terrestres, aquáticos e aéreos. Os terrestres são subdivididos em robôs que possuem rodas, pernas (bípedes) ou esteiras, em que cada um possui características específicas quanto ao movimento a ser realizado. Os bípedes, por exemplo, simulam um caminhar antropomórfico, semelhante aos humanos.

De acordo com [He e Gao \(2020\)](#), mais de 50% da superfície terrestre é inacessível por veículos tradicionais com rodas e trilhas. Enquanto, robôs com pernas possuem uma maior mobilidade em ambientes irregulares porém, eles possuem mecanismos e modos de controle muito mais complexos. ([WIEBER; TEDRAKE; KUINDERSMA, 2016](#))

Segundo [He e Gao \(2020\)](#) a performance de robôs com pernas esta relacionada com vários fatores, incluindo seus mecanismos, atuação, percepção, e métodos de controle. Por isso, é necessário realizar uma pesquisa sobre a evolução dessas tecnologias.

O desenvolvimento desta documentação consiste na análise dos robôs humanóides tendo como base alguns dos principais artigos relacionados ao seu estudo assim como informações disponibilizadas pelos desenvolvedores, destacando suas principais características físicas como tipos de sensores utilizados pelo sistema de percepção e estratégias de design mecânico e também informações relacionadas ao sistema de controle.

1.1 Objetivo

O estudo bibliográfico foi realizado com o intuito de auxiliar no desenvolvimento do projeto Walker que tem como objetivo construir um robô humanóide autônomo de pequeno porte. Esta pesquisa visa contribuir com informações obtidas através das análises das principais características dos sistemas dos robôs humanoídes já existentes.

1.2 Justificativa

Robôs antropomórficos são amplamente utilizados em diversas áreas no dia-a-dia, desde interações com humanos até aplicações na área da saúde, bem como em pesquisas

acadêmicas, sendo uma configuração mais adequada para transposição de ambientes de difícil navegação.

[Gupta e Kumar \(2017\)](#) destacam que a vantagem da locomoção por pernas é a utilização de passos discretos para o equilíbrio e a movimentação do robô, o que permite que este realize manobras em terrenos acidentados e escadas. E, dentre os robôs com pernas, os robôs bípedes oferecem outras vantagens como mãos livres para manipulação, locomoção com maior eficiência energética e a capacidade de torcer os pés para rotacionar em torno do eixo longitudinal do seu próprio corpo.

Uma abordagem trazida por [Joseph et al. \(2018\)](#) aponta a aplicação dos robôs humanóides para auxiliar cuidadores e pacientes, especialmente em áreas de risco, como ambientes contaminados. Podendo ser utilizados para usos médicos e cirúrgicos, para dar assistência aos pacientes e cuidadores e também para a área de segurança.

E, segundo [Chatterjee, Chaudhuri e Vrontis \(2021\)](#) os robôs humanóides são vantajosos para serem aplicados em atividades domésticas, podendo ajudar no cuidado de idosos, podem ser uma fonte de entretenimento, além de realizar as tarefas domésticas.

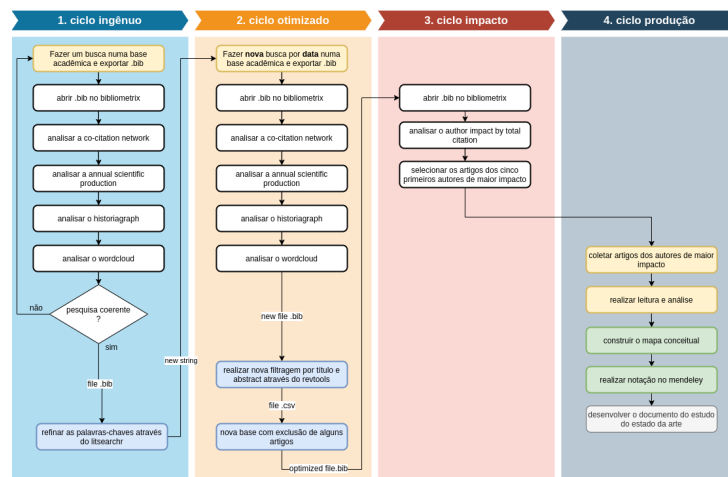
Metodologia

Para o desenvolvimento deste estudo do Estado da Arte dos robôs antropomórficos foi utilizada a metodologia do método BILI (Bibliographic and Literary Review Method), a qual será explicada nos tópicos seguintes.

2.1 Método bili

O método BILI (Bibliographic and Literary Review Method) é uma metodologia de pesquisa para o estudo das revisões bibliográficas que visa otimizar a busca e a seleção das referências. Este método é composto por quatro fases e utiliza ferramentas como o Rstudio, o Cmaptools e o Mendeley para a seleção, revisão e organização das documentações encontradas. Através desta metodologia é possível encontrar os artigos e autores mais relevantes para a pesquisa.

Figura 2.1: Ciclos do método BILI



2.1.1 Fase 1

A primeira fase é denominada de ciclo ingênuo e corresponde a pesquisa inicial feita em uma base acadêmica de onde foi exportado o arquivo .bib. Através deste arquivo utilizando a ferramenta biblioshiny, fornecida pelo pacote Bibliometrix, foi feita uma análise da rede de co-citação, da produção científica anual e das palavras que aparecem com maior frequência nos artigos. Caso estas informações estejam coerentes com a pesquisa

desejada, o pacote litsearchr é utilizado para auxiliar no refinamento da pesquisa através das palavras-chaves. Se o resultado obtido não for satisfatório a busca na base acadêmica deve ser refeita. E, por fim, foi gerada uma nova string que foi utilizada para realizar uma nova busca.

2.1.2 Fase 2

A fase dois é chamada de ciclo otimizado pois, nesta fase foi feita uma nova busca na base acadêmica porém, utilizando as palavras-chaves refinadas. Desta forma, o passo seguinte foi realizar a mesma análise feita no primeiro ciclo e, após está análise foi feita uma filtragem dos artigos utilizando o Revtools. Esta ferramenta permite o pesquisador selecionar os melhores artigos para sua pesquisa através da leitura dos títulos e abstracts. E, então foi exportado um novo arquivo .bib com os dados otimizados para a pesquisa.

2.1.3 Fase 3

Na terceira fase, denominada ciclo impacto, foi feita a análise do impacto do autor utilizando o bibliometrix. E, então foram selecionados os artigos dos cinco primeiros autores de maior impacto.

2.1.4 Fase 4

Na última fase, chamada de ciclo produção, é feita a leitura e análise dos artigos selecionados no ciclo anterior e então foi construído um mapa conceitual sobre a pesquisa assim como, todos os artigos selecionados foram armazenados no Mendeley, onde também foram feitas algumas anotações. E, por fim, foi desenvolvida esta documentação com base nestas análises.

Estudo do estado da arte

3.1 *Robôs Antropomórficos*

Robôs antropomórficos, também conhecidos como humanoides, possuem uma estrutura baseada no corpo humano, com membros e movimentos que visam uma mobilidade que permita ao robô realizar tarefas diversificadas, principalmente para auxiliar as pessoas em atividades diárias, para o entretenimento e realizar tarefas de risco.

De acordo com [Li et al. \(2021\)](#) em comparação com outros tipos de robôs, os humanoides são mais adaptáveis ao ambiente e possuem uma boa habilidade para evitar obstáculos, por isso atraem a atenção de muitos pesquisadores.

Estes robôs movimentam-se e ajustam o seu equilíbrio por meio das suas duas pernas, inclusive em terrenos irregulares. Sendo a habilidade de andar com um bom equilíbrio a sua habilidade mais básica.

Para ter uma boa mobilidade e ser capaz de realizar as tarefas propostas o robô deve possuir uma locomoção rápida e estável, por isso o gerador de trajetórias e o controlador são projetados visando uma locomoção rápida, flexível e robusta. Portanto, são estes os principais desafios no desenvolvimento deste tipo de robô.

3.1.1 *Definição*

Os robôs antropomórficos, também conhecidos como humanoides, são robôs que possuem atributos semelhantes a forma humana como cabeça, braços e pernas. São robôs bípedes, ou seja, que se locomovem sobre os dois pés.

3.1.2 *Componentes principais*

A percepção visual é fundamental para a maioria dos sistemas autônomos que operam em ambientes repletos de obstáculos e para realizar uma série de tarefas essenciais como interagir com o humano, manipular e rastrear objetos. ([JOSEPH et al., 2018](#))

Chatterjee, Chaudhuri e Vrontis (2021) aponta que os robôs domésticos utilizam da Inteligência Artificial para possuir habilidades como reconhecimento de voz, reconhecimento facial humano, emoção, entre outros.

E, para garantir que o robô alcance uma locomoção estável e rápida deve-se atentar-se ao projeto da estrutura cinemática do robô e a alguns objetivos do design para melhorar a dinâmica dos membros do robô.(BUSCHMANN; LOHMEIER; ULBRICH, 2009)

3.2 Modelos de robôs bípedes

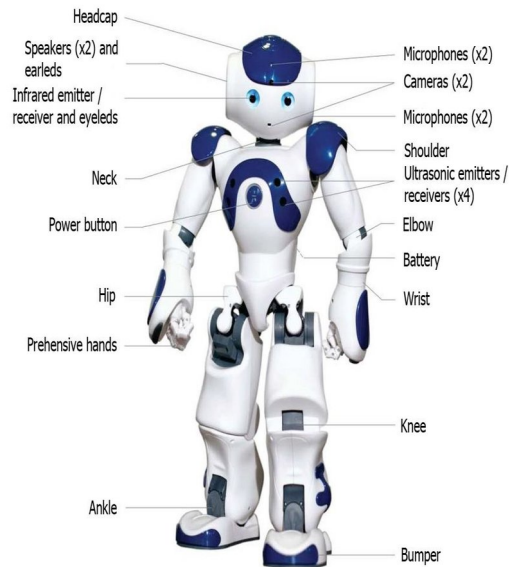
Nesta seção serão abordadas as principais características de alguns modelos de robôs humanoides comumente utilizados por pesquisadores para realizar estudos sobre a locomoção bípede.

3.2.1 Robô NAO

O NAO (Figura 3.1) é um robô desenvolvido pela SoftBank Robotics muito utilizado para pesquisas e educação. Originalmente, ele foi criado pela Aldebaran Robotics para ser um companheiro doméstico. Dentre as suas principais aplicações estão a sua utilização como assistente em empresas e institutos de saúde. Este robô utiliza um framework específico conhecido como NAOqios, o qual utiliza Python ou C++.

O NAO possui 58cm de altura, duas câmeras 2D para reconhecer objetos e pessoas, é capaz de se comunicar em diversas línguas por meio dos seus quatro microfones e speakers. O robô também dispõe de sete sensores de toque localizados na sua cabeça, nas suas mãos e pés, sonares e uma IMU para reconhecer seu ambiente e se localizar no espaço. Ele apresenta um total de 25 graus de liberdade o que permite que ele se movimente e se adapte no ambiente.

Figura 3.1: Robô NAO

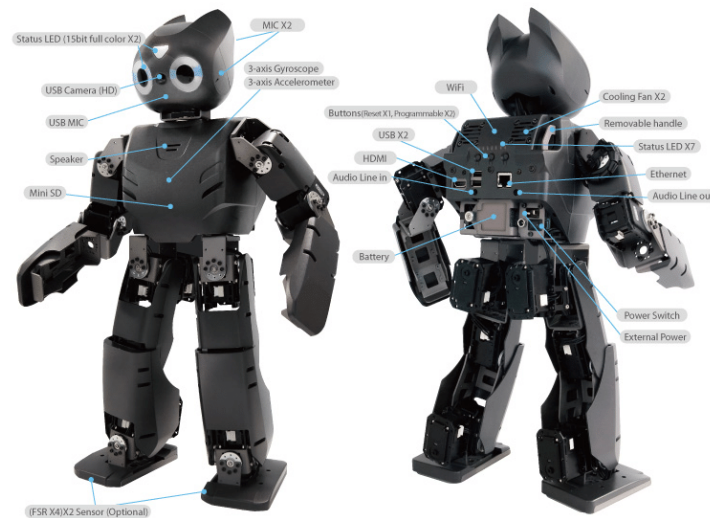


Fonte: ([SOFTBANK](#), 2021).

3.2.2 Robô DARWIN-OP

O Darwin-OP (Dynamic Anthropomorphic Robot with Intelligence-Open Platform) é um pequeno humanoide desenvolvido pela Robotis. Ele tem 20 graus de liberdade e pesa 2.9kg, possui uma camera HD, giroscópio, acelerômetro e um microfone stereo. O Darwin é capaz de andar, falar e dançar sendo bastante utilizado por pesquisadores e programadores.

Figura 3.2: Robô Darwin-OP

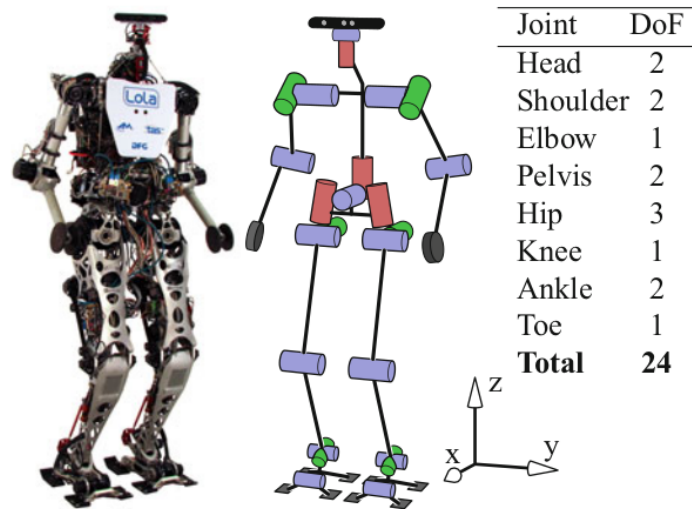


Fonte: ([TROSSEN, 2021](#)).

3.2.3 Robô LOLA

O Lola é um robô humanoide desenvolvido na Universidade Técnica de Munich (TUM) e financiado pela Fundação de pesquisa alemã (DFG), utilizado em pesquisas sobre a dinâmica e aspectos de controle da locomoção bípede. A versão do Lola ilustrada na Figura 3.3 possui 24 graus de liberdade, uma altura de 180cm e pesa aproximadamente 60kg. O seu design foi projetado para possuir pouco peso, uma rigidez efetiva alta, pernas com uma inércia baixa e o centro de gravidade alto. Com relação aos sensores utilizados pelo robô, o Lola possui encoders nos eixos dos seus motores e sensores de força/torque (FTS) customizados em seus pés, apresenta uma IMU em seu torso e uma câmera Intel RealSense em sua cabeça. É um robô versátil, com um design projetado para demonstrar uma caminhada bípede rápida.

Figura 3.3: Robô LOLA




Fonte: ([TUM, 2021](#)).

3.2.4 Robô HUBO 2

O HUBO 2 foi desenvolvido no laboratório HUBO no KAIST (Korean Advanced Institute of Science and Technology), na Coreia do Sul. Ele possui 125cm, pesa 45kg e possui 40 graus de liberdade. O seu design tinha como objetivo ser bem leve, o que permitiu que o HUBO 2 fosse capaz de correr em uma velocidade de 3.6 km/h. O seu sistema de percepção é composto por câmeras, sensores de inércia, inclinação e força/torque. O seu grande diferencial em relação a outros robôs bípedes é a capacidade de utilizar uma marcha com pernas esticadas.

Figura 3.4: Robô HUBO 2



Contents	Value
Weight	45 kg
Height	1.25 m
DOF	40 (10 for fingers)
Walking Speed	1.5 km/h
Running Speed	3.6 km/h
Walking Cycle	0.8 s
Running Cycle	0.33 s
Flight time	0.05 s

Fonte: ([WEVOLVER](#), 2021).

3.3 *Estudo das funcionalidades e mecanismos*

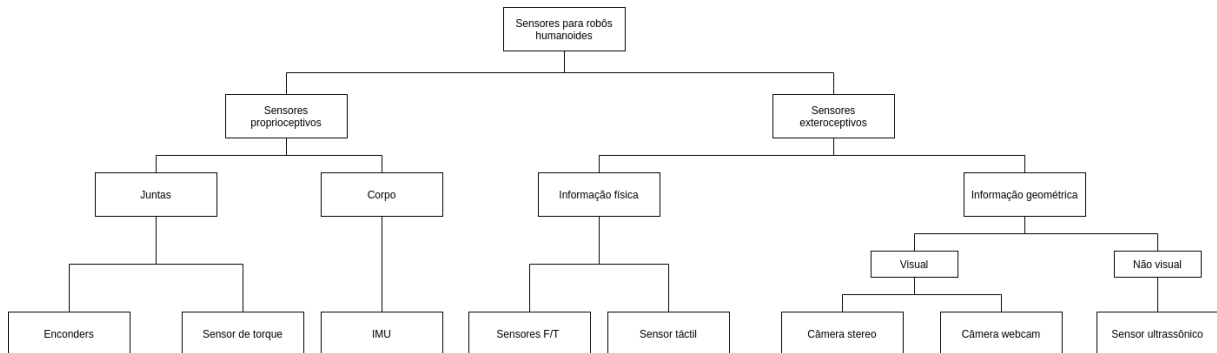
Nesta seção serão apresentadas as principais características dos sistemas de percepção e controle dos robôs antropomórficos, assim como da estrutura mecânica destes robôs. Estes são quesitos de extrema importância no desenvolvimento destes robôs pois influenciam na eficiência do seu sistema.

3.3.1 *Percepção*

Os sensores comumente usados nos robôs humanoides podem ser classificados em dois grupos (Figura 3.5), os sensores proprioceptivos são utilizados para medir os estados de cada junta e do corpo do robô e os sensores exteroceptivos são utilizados para obter informações do ambiente ([HE](#); [GAO](#), 2020).

Os sensores internos são utilizados para medir o estado do robô, como ângulos, velocidades e torques das juntas. Para detectar informações da postura do robô, utiliza-se os sensores IMU, incluindo acelerômetros e giroscópios. Enquanto, a interação entre o robô e o ambiente podem ser detectadas por meio de sensores táteis e de força/torque. E, as câmeras e sensores de alcance medem e estimam as informações do ambiente ao redor do robô ([GOSWAMI](#); [VADAKKEPAT](#), 2019).

Figura 3.5: Classificação dos sensores



O sistema de sensores do LOLA, por exemplo, de acordo com [Buschmann, Lohmeier e Ulbrich \(2009\)](#), é otimizado para qualidade de sinal e largura de banda. Sensores angulares absolutos nos eixos de saída de todas as juntas compensam as elasticidades e não linearidades, permitindo que o robô (teoricamente) comece a partir de posições arbitrárias. Dois sensores de força / torque de seis eixos feitos sob medida são fortemente integrados à estrutura do pé. Com um peso total de 395g, o sensor inclui uma proteção contra sobrecarga. A unidade de medição inercial (IMU) estima a orientação e as velocidades angulares da parte superior do corpo. foi escolhida IMU de alta precisão com giroscópios de fibra ótica e acelerômetros MEMS, visto que a precisão e a qualidade do sinal do IMU afetam consideravelmente o desempenho do controlador de estabilização

Já no projeto desenvolvido por [Kien, Shanmugavel e Ragavan \(2017\)](#) quatro sensores ultrassônicos, dois em cada perna, são usados para feedback da posição para caminhar e girar. O acelerômetro é usado para medir o ângulo de inclinação e para detectar a queda instantânea do robô. Sensores Resistivos de Força (FSR) são usados para determinar o centro de pressão (COP), que por sua vez é usado para calcular o ZMP do robô.

3.3.2 Mecanismos

Um robô humanoide tem o formato do corpo semelhante ao de um corpo humano e tem como base a literatura sobre a análise e coordenação da marcha humana. Eles possuem um grande número de graus de liberdade (DOF), para serem capazes de realizar um movimento bípede semelhante ao humano. Para que este movimento seja mais natural e flexível, segundo [Buschmann, Lohmeier e Ulbrich \(2009\)](#), recomenda-se considerar uma configuração redundante com DOFs adicionais.

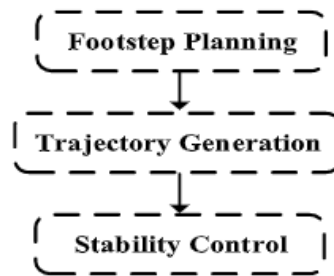
Para melhorar a dinâmica das pernas do robô deve-se garantir uma rigidez mecânica suficiente, centro de massa alto e baixos momentos de inércia dos elos das pernas.

O objetivo básico do projeto de um robô humanoide, é, portanto, equilibrar a rigidez estrutural e o desempenho do atuador com a leveza dos componentes mecânicos. A estrutura mecânica do Lola, por exemplo, é caracterizado pelo design leve e consistente com alta rigidez efetiva 3.2.3. São utilizados servo atuadores leves e a inércia resultante das pernas é minimizada por um design sofisticado da estrutura e mecanismos de acionamento, resultando em um comportamento de aceleração superior.

3.3.3 Controle

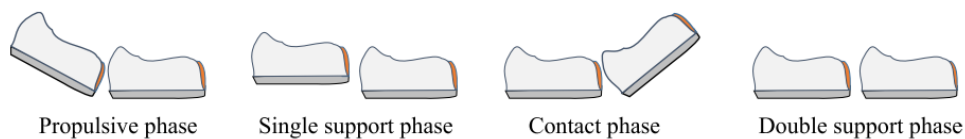
A figura 3.6 ilustra os passos necessários para o controle da caminhada de um robô humanoide, onde a primeira etapa deste processo é o planejamento dos passos o qual é feito através do ajuste de alguns parâmetros de forma que o robô realize os movimentos de acordo com as fases de suporte dos pés ilustradas na figura 3.7.

Figura 3.6: Elementos para o desenvolvimento do controlador de caminhada



Fonte: (KASHYAP; PARHI, 2021).

Figura 3.7: Diferentes fases de suporte dos pés durante a locomoção de robôs humanoides

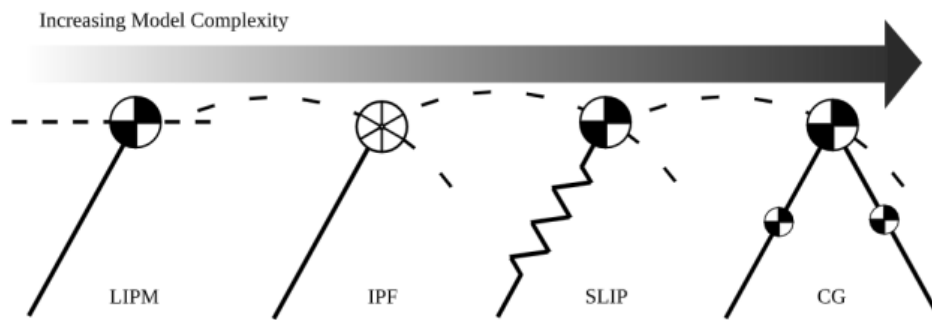


Fonte: (KASHYAP; PARHI, 2021).

Existem basicamente dois tipos de marchas observadas em sistemas com pernas: estaticamente estável e dinamicamente estável. Se o passo do robô permite que a projeção do seu centro de massa permaneça suficientemente dentro do polígono de suporte, projetado pelo pé do robô, então é estaticamente estável. E, se a projeção ocasionalmente sai do polígono de suporte, não deixando o robô cair ou tombar, então o sistema é dinamicamente estável (GOSWAMI; VADAKKEPAT, 2019).

Existem quatro modelos que são frequentemente utilizados como representação aproximada do robô bípede (Figura 3.8). O Modelo do Pêndulo Invertido Linear (LIPM) considera que toda a massa do robô está concentrada em um ponto movendo-se em uma altura constante e assume que as pernas não possuem peso, este modelo foi amplamente aplicado em diversas pesquisas como por [Kashyap e Parhi \(2021\)](#), que utilizaram a técnica de otimização por enxame de partículas (PSO) para refinar o controlador PID convencional e bastante estudado e aplicado por [Kajita et al. \(2001\)](#).

Figura 3.8: Modelos frequentemente utilizados como representações dos robôs bípedes



Fonte: ([GRIZZLE et al., 2014](#)).

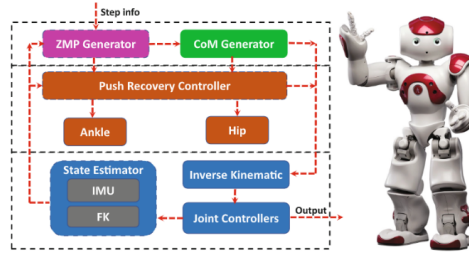
Um outro modelo é o Pêndulo Invertido com Volante (IPF) que não considera a altura constante e adiciona um volante para contabilizar o momento angular interno. O Pêndulo Invertido com Mola (SLIP) adiciona uma mola para modelar as pernas do robô como um pula-pula sem massa. E o Compass -Gait Biped (CG) que trata o robô como um pêndulo duplo com massas concentradas no centro de massa e nas pernas oscilantes ([GRIZZLE et al., 2014](#)). Ao utilizar um modelo de robô reduzido [Wahrmann et al. \(2017\)](#), por exemplo, foi capaz de implementar a estratégia no controle em tempo real tornando o robô mais robusto contra erros de percepção e de superfícies irregulares.

Posteriormente, deve-se implementar um gerador de trajetórias, o qual gera algum tipo de movimento considerando o deslocamento do Centro de Massa (COM) e do Ponto de Momento Zero (ZMP) assim como, a descrição da cinemática inversa. Desta forma, os ângulos das juntas do robô são obtidas. E, então é necessário um controlador para estabilizar estes ângulos para garantir que o robô permaneça em pé e realize todas as tarefas sem cair. ([KASHYAP; PARHI, 2021](#))

[Kasaei et al. \(2018\)](#) apresenta uma estrutura de um controlador com um loop fechado baseada no método Central Pattern Generator (CPG) que propõem um modelo de controle inspirado nas características biológicas (Figura 3.9). Desta forma, este método tenta produzir um caminhar estável através de padrões rítmicos em relação a movimentação dos seus membros. Este teste foi realizado em um robô NAO simulado com a proposta de

gerar uma movimentação estável e rápida.

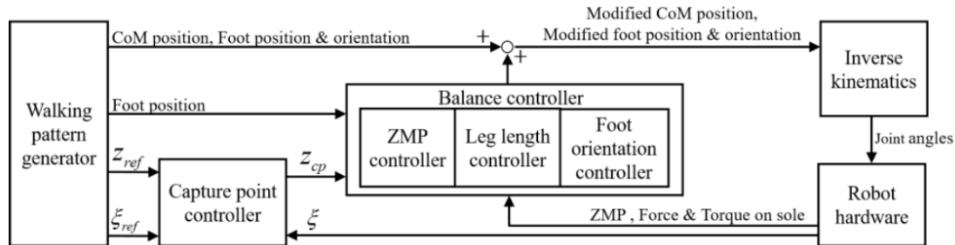
Figura 3.9: Arquitetura geral do gerador de passos



Fonte: (KASAEI et al., 2018)

Em sua pesquisa Joe e Oh (2019) implementam um framework de controle do equilíbrio que estabiliza os passos do robô em relação aos distúrbios. O controlador de equilíbrio é formado pelos controladores de orientação dos pés, comprimento da perna e ZMP. Os testes foram realizados no robô DRC-HUBO+ modificado. E, o framework proposto apresentou bons resultados permitindo que o robô se deslocasse de forma estável mantendo a postura desejada em terrenos irregulares.

Figura 3.10: Visão geral do fluxo de informações do framework de controle de equilíbrio proposto














Fonte: (JOE; OH, 2019)

O projeto de controle para sistemas subactuados são mais difíceis devido a quantidade de graus de liberdades controláveis ser menor que a real quantidade de grau de liberdade do sistema. Gupta e Kumar (2017) abordam outras estratégias de controle desenvolvidas para robôs subactuados como virtual constraints, HZD (Hybrid Zero Dynamics), Pointcaré map.

Comparativo entre modelos de robôs antropomórficos

Tabela Comparativa de Robôs Antropomórficos

Name	Robot	DOFs	Height	Weight	Speed	Actuators	Power	Sensors	Computing	Software	Developer
LOLA		26 (Head: 2 DoF; Arm: 4 DoF x 2; Pelvis: 2 DoF; Leg: 7 DoF x 2)	176cm	68 kg	3.38 km/h (biped); 1.8 km/h (uneven terrain with or without additional hand contacts)	Custom design with brushless DC motors and harmonic drive gears. Parallel kinematics in legs. Up to 380 Nm torque (knee joint with roller screw mechanism)	24-V and 80-V circuit (external supply)	Torso with IMAR IVRU-FC-C167 IMU. Feet with custom force-torque sensor. Hands with Schunk FTE-Axia80 force-torque sensor. Head with Intel RealSense T265 and D435 cameras. Joints with incremental (motor side) and absolute (link side) encoders.	Two mini-ITX industrial boards each with Intel Core i7-8700 (6x3.2 GHz) CPU and 32 GB DDR4 RAM; Nvidia Quadro P2000 GPU; ELMO servo controllers for each joint; EtherCAT communication bus	QNX Neutrino RTOS 7.0 for control; Ubuntu 20.04 for computer vision; broccoli	DFG (German Research Foundation)
ASIMO		57 (Head: 3 DoF; Arm: 7 DoF x 2; Hand: 13 DoF x 2; Hip: 2 DoF; Leg: 6 DoF x 2)	130 cm	48 kg	9 km/h (running); 2.7 km/h (walking)	More than 26 DC motors and brushless DC motors	51.8-V lithium-ion battery, 1 hour of operation	Head with cameras and microphones. Torso with gyroscope and accelerometer. Foot with six-axis force sensor. Hands with tactile sensors in the palms and force sensor on each finger	Custom computing and control system	VxWorks real-time OS and custom control software	Honda
HUBO 2		40 (Neck: 3 DoF; Arm: 7 DoF x 2; Hand: 5 DoF x 2; Torso: 1 DoF; Leg: 6 DoF x 2)	125 cm	45 kg	1.5 km/h (walking); 3.6 km/h (running)	44 brushless DC motors (19 200-W 48-V motors, six 100-W 48-V motors, nine 11-W 48-V motors, and 10 0.75-W 12-V motors)	48-V lithium-polymer battery	Camera, three-axis force-torque sensor, two-axis inertial sensor, two-axis tilt sensor	Two PC/104 embedded computers with solid state drives	Windows XP OS with RTX (Real-Time Extension) for Windows	KAIST (Korea Advanced Institute of Science and Technology)
ATLAS		28	150 cm	80 kg	5.4 km/h	Hydraulic actuation with custom servo-valves	Battery powered	Lidar and stereo vision	Custom control and computing system	Custom software	Boston Dynamics
DARWIN-OP		20 (Leg: 6 DoF x 2; Arm: 3 DoF x 2; Neck: 2 DoF)	45.5 cm	2.9 kg	0.86 km/h	Dynamixel MX-28T actuators (DC servos with contactless absolute encoders)	11.1-V 1000-mAh lithium-polymer battery, 30 minutes of operation. Or external power supply	HD camera, three-axis gyroscope, three-axis accelerometer, stereo microphone, Force sensors optional	Intel Atom 1.6 GHz CPU (main computer), ARM Cortex M3 72 MHz CPU (subsystem), wireless network	Ubuntu Linux OS, Darwin-OP software framework (open source, written in C++)	Robotis
NAO		25 (Head: 2 DoF; Arm: 5 DoF x 2; Pelvis: 1 DoF; Leg: 5 DoF x 2; Hand: 1 DoF x 2)	58 cm	5.5 kg	0.3 km/h	25 Portescap brush coreless DC motors	27.6-Wh lithium-ion battery, 90 minutes of operation	Two 5-megapixel OmniVision cameras, inertial unit with three-axis accelerometer and two gyros, sonar rangefinder, four omnidirectional microphones, two infrared sensors, nine tactile sensors, and eight pressure sensors	Intel Atom 1.91 GHz quad-core CPU, 4 GB RAM, 32 GB SSD, Bluetooth, Wi-Fi, and Ethernet	Linux OS and Choregraphe suite for programming and visualization	SoftBank Robotics (originally created by Aldebaran Robotics, acquired by SoftBank in 2015)
KHR-3		22 (max)	40.1 cm	1.5 kg	N/A km/h	Up to 35 serial servos	10.8-V 800-mAh nickel-metal hydride battery	Gyros, accelerometer, and other optional sensors.	Microcontroller board RCB-4 with 10 A/D and 10 PIO extension ports. USB connection with PC and remote/Bluetooth controller	Heart to Heart software	Kondo Kagaku
SURENA Mini		23	53 cm	3.6 kg	-	-	-	-	-	-	University of Tehran
HR-OS1		-	-	-	-	DYNAMIXEL AX-12A	3-cell 11.1v 2200 mAh LIPO Battery	USB Webcam; IMU (Gyroscope, Accelerometer)	Raspberry Pi 2; Arbotix-Pro Robocontroller (Subcontroller)	Linux open source C++ framework	-
OP3		20	510mm	3.5kg (without skin cover)	-	DYNAMIXEL XM-430	Lipo 3cell 11.1v 1800mA	Camera Logitech C920 (1920x1080);IMU Sensor (Gyroscope, Accelerometer, Magnetometer)	Intel i3 based NUC; 8GB DDR4; M.2 SSD module (128GB); OpenCR (Subcontroller)	OS : Linux (64-bit) C++, ROS, DYNAMIXEL SDK	ROBOTIS
ROFI		12	-	-	-	Servo motors	2 LIPO batteries - 7.4v output	Ultrasonic sensors; accelerometer	Arduino Mega, Android tablet	-	-

Referências

- BUSCHMANN, T.; LOHMEIER, S.; ULBRICH, H. Humanoid robot lola: Design and walking control. *Journal of Physiology Paris*, v. 103, n. 3-5, p. 141–148, 2009. Cited By 61. Disponível em: <<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-71149103494&doi=10.1016%2fj.jphysparis.2009.07.008&partnerID=40&md5=b0819741b21b844768269bf3a5859fb4>>. Citado 3 vezes nas páginas 3.1.2, 3.3.1, and 3.3.2.
- CHATTERJEE, S.; CHAUDHURI, R.; VRONTIS, D. Usage intention of social robots for domestic purpose: From security, privacy, and legal perspectives. *Springer Nature 2021*, 2021. Citado 2 vezes nas páginas 1.2 and 3.1.2.
- GOSWAMI, A.; VADAKKEPAT, P. *Humanoid Robotics: A Reference*. [S.l.: s.n.], 2019. Citado 2 vezes nas páginas 3.3.1 and 3.3.3.
- GRIZZLE, J. et al. Models, feedback control, and open problems of 3d bipedal robotic walking. *Automatica*, v. 50, n. 8, p. 1955–1988, 2014. Cited By 162. Disponível em: <<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84905269697&doi=10.1016%2fj.automatica.2014.04.021&partnerID=40&md5=738ce4fc908a8b5f96a81b7426c66fb3>>. Citado 2 vezes nas páginas 3.8 and 3.3.3.
- GUPTA, S.; KUMAR, A. A brief review of dynamics and control of underactuated biped robots. *Advanced Robotics*, v. 31, n. 12, p. 607–623, 2017. Cited By 25. Disponível em: <<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85017159972&doi=10.1080%2f01691864.2017.1308270&partnerID=40&md5=2ddddea7309cfb08e08e036a9002845c>>. Citado 2 vezes nas páginas 1.2 and 3.3.3.
- HE, J.; GAO, F. Mechanism, actuation, perception, and control of highly dynamic multilegged robots: A review. *Chinese Journal of Mechanical Engineering (English Edition)*, v. 33, n. 1, 2020. Cited By 6. Disponível em: <<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85095696025&doi=10.1186%2f10033-020-00485-9&partnerID=40&md5=c11601e75687cad0fa5dc55968df0d3f>>. Citado 2 vezes nas páginas 1 and 3.3.1.
- JOE, H.-M.; OH, J.-H. A robust balance-control framework for the terrain-blind bipedal walking of a humanoid robot on unknown and uneven terrain. *Sensors (Switzerland)*, v. 19, n. 19, 2019. Cited By 8. Disponível em: <<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85072779692&doi=10.3390%2f19194194&partnerID=40&md5=660a183954297e85f178601caad36247>>. Citado 2 vezes nas páginas 3.3.3 and 3.10.
- JOSEPH, A. et al. A review on humanoid robotics in healthcare. In: . [s.n.], 2018. v. 153. Cited By 21. Disponível em: <<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85043253487&doi=10.1051%2fmateconf%2f201815302004&partnerID=40&md5=7544ca444cc5954672be5cd939294155>>. Citado 2 vezes nas páginas 1.2 and 3.1.2.
- KAJITA, S. et al. The 3d linear inverted pendulum model: A simple modeling for a bipedwalking pattern generation. In: . [S.l.: s.n.], 2001. Citado na página 3.3.3.

KASAEI, S. et al. A hybrid zmp-cpg based walk engine for biped robots. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, v. 694, p. 743–755, 2018. Cited By 4. Disponível em: https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85042234860&doi=10.1007%2f978-3-319-70836-2_61&partnerID=40&md5=91dabacb22929d09d6d68d97887ba80a. Citado 2 vezes nas páginas 3.3.3 and 3.9.

KASHYAP, A.; PARHI, D. Particle swarm optimization aided pid gait controller design for a humanoid robot. *ISA Transactions*, v. 114, p. 306–330, 2021. Cited By 6. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85098214534&doi=10.1016%2fj.isatra.2020.12.033&partnerID=40&md5=05d7f68dc6f7f08a0c911055e5b98e83>. Citado 4 vezes nas páginas 3.6, 3.7, 3.3.3, and 3.3.3.

KIEN, E.; SHANMUGAVEL, M.; RAGAVAN, S. V. Motion planning of a bipedal walking robot with leg-mounted ultrasonic sensors-an experimental study. In: . [s.n.], 2017. Cited By 0. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85025597826&doi=10.1109%2fRAHA.2016.7931874&partnerID=40&md5=0d63a61c961eda77400ba7a08992085a>. Citado na página 3.3.1.

LI, L. et al. Trajectory planning of flexible walking for biped robots using linear inverted pendulum model and linear pendulum model. *Sensors (Switzerland)*, v. 21, n. 4, p. 1–26, 2021. Cited By 1. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85100267374&doi=10.3390%2fs21041082&partnerID=40&md5=5f9525717e61fd6db963e228a071868a>. Citado na página 3.1.

RUBIO, F.; VALERO, F.; LLOPIS-ALBERT, C. A review of mobile robots: Concepts, methods, theoretical framework, and applications. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, v. 16, p. 172988141983959, 03 2019. Citado na página 1.

SOFTBANK, R. NAO. 2021. <https://www.softbankrobotics.com/emea/en/nao>. Accessed: 2021-10-16. Citado na página 3.1.

TROSSEN, R. *Darwin-OP Delux Humanoid Robot*. 2021. <https://www.trossenrobotics.com/p/darwin-OP-Deluxe-humanoid-robot.aspx>. Accessed: 2021-10-16. Citado na página 3.2.

TUM. *Humanoid Robot LOLA*. 2021. <https://www.mec.ed.tum.de/am/forschung/aktuelle-projekte/robotik/humanoider-roboter-lola/>. Accessed: 2021-10-16. Citado na página 3.3.

WAHRMANN, D. et al. Modifying the estimated ground height to mitigate error effects on bipedal robot walking. In: . [s.n.], 2017. p. 1471–1476. Cited By 3. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85028764835&doi=10.1109%2fAIM.2017.8014226&partnerID=40&md5=a823c4e5cc994ca9f8814656fb1b47c1>. Citado na página 3.3.3.

WEVOLLER. *Hubo Humanoid Robot*. 2021. <https://www.wevolver.com/wevolver.staff/hubo.humanoid.robot>. Accessed: 2021-10-16. Citado na página 3.4.

WIEBER, P.-B.; TEDRAKE, R.; KUINDERSMA, S. *Modeling and control of legged robots*. [s.n.], 2016. 1203-1234 p. Cited By 55. Disponível em: https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85069208141&doi=10.1007%2f978-3-319-32552-1_48&partnerID=40&md5=347caafe5b964b2affce05710cdbfa11. Citado na página 1.

Estudo do Estado da Arte sobre robôs antropomórficos

Juliana Maria S. de Santana

Salvador, Novembro de 2021.