

Uma Introdução ao Projeto e Desenvolvimento de Robôs Autômatos que Caminham

Jardel Vieira¹, M. H. Stoppa²

Universidade Federal de Goiás, Câmpus Catalão, Curso de Matemática Industrial,
75700-000, Brasil

jardelcurio@hotmail.com, mhstoppa@cnpq.pq.br

Palavras-chave: Robótica, Mindstorms NXT[®], Robôs que caminham, Autômatos.

Introdução

O homem é ser em constante movimento, e seu próprio modo locomoção comparado ao dos outros animais, seja andar, correr, nadar, pular, voar, sempre foi motivo para o desenvolvimento de novas máquinas e novas tecnologias.

As máquinas móveis se colocam num mundo de desenvolvimento produzido por razões mais práticas, ou até utópicas. Os homem, quando comparado à muitos animais não são consideravelmente rápidos ou fortes, o que sempre despertou uma vontade de igualar esta situação.

As rodas são adequadas para superfícies firmes, sendo inviáveis para utilização em terrenos macios ou irregulares, como por exemplo, a neve, ou montanhas, uma vez que necessitam de um contato contínuo com o solo, exigindo uma superfície uniforme e firme, como uma estrada, o que inviabiliza seu uso se a estrada não existir. Além disso, o ser humano, é o único ser vivo que faz uso natural das rodas (INGRAM, A. J., 2004).

Não se pode ignorar a utilidade das rodas no desenvolvimento da humanidade, porém, é salutar a busca pela construção de outros mecanismos que cubram a lacuna que os veículos dotados de rodas deixaram, mesmo com toda a tecnologia existente. Estes mecanismos são denominados de forma simplista como máquinas móveis, onde o movimento, em real, é realizado por meio de “pernas”.

Uma maneira conveniente de classificar as máquinas móveis é agrupá-las em função de seu número de pernas, o que acaba sendo uma classificação natural, pois, os

Revisado pelo orientador

¹ Orientado: Jardel Vieira

² Orientador: Prof. Dr. Marcelo H. Stoppa

humanos e pássaros são bípedes, os mamíferos e répteis são quadrúpedes, os insetos são hexápodes, e assim por diante (INGRAM, A. J. 2006).

O número de pernas tem um impacto considerável na física do caminhar, uma vez que é trivial o fato de que, para manter a posição de uma estrutura no espaço 3D, são necessários três pontos de apoio. Se uma máquina tem menos de 3 pernas ela é dita ter balanceamento dinâmico, como no caso do ser humano. Isto será discutido com mais detalhes, posteriormente.

Objetivos

Este artigo propõe um estudo sobre a construção de mecanismos capazes de se locomoverem através de pernas, analisando os conceitos sobre a ação de caminhar, principalmente seus aspectos físicos, conhecendo diversos tipos de mecanismos, construindo protótipos e programando ações simples para estes.

Metodologia

A metodologia utilizada nesse trabalho consiste na leitura na bibliografia e consulta na internet, para então se realizar a construção de protótipos. No que tange a construção de protótipos, esta foi realizada em quatro fases:

- Idealização: definição do tipo de mecanismo a ser construído e da tarefa que ele deve realizar, isto é, o objetivo da construção;
- Pré-projeto: levantamento e seleção de recursos e opções para a construção dos robôs;
- Montagem: consiste na construção propriamente dita.
- Melhorias: análise da estabilidade, desempenho e segurança do mecanismo, para então fazer as correções necessárias.

No entanto, esta sequência de fases para a construção de um protótipo não é uma estrutura rígida e, como Astolfo, Ferrari e Ferrari (2007) reforçam, não há regras ou guias para a construção de mecanismos LEGO.

Após a construção dos protótipos, é realizada a implementação de tarefas, ou seja, a programação do robô. A criação dos programas pode ser dividida em fases análogas às fases de construção dos mecanismos, porém, no lugar do pré-projeto, tem-se a criação

do pseudocódigo e no lugar da montagem, tem-se a escolha do software de programação e transcrição do pseudocódigo para a linguagem escolhida. A programação dos protótipos apresentados neste artigo foi desenvolvida no software NXY-G que acompanha o kit LEGO® (KELLY, 2007).

Conceitos elementares

Para a construção de mecanismos capazes de se locomoverem através de pernas, primeiramente faz-se necessário conhecer alguns conceitos importantes para se gerar um movimento de caminhada eficaz. Sendo assim, primeiramente deve-se entender o que é caminhar. De acordo com Astolfo, Ferrari e Ferrari (2007), caminhar “é o processo de levantar uma ou mais pernas do chão, enquanto as outras pernas (uma ou mais) apoiam o corpo. Quando uma perna é levantada, o corpo avança e a perna é abaixada de volta ao solo. A partir daí o processo continua com outra perna, e assim por diante” (tradução nossa).

No entanto, para que esse processo de locomoção aconteça normalmente, ele não deve ser desequilibrado. Fazendo uma analogia, observa-se uma mesa de três pernas, se uma das pernas for removida, a mesa não mais ficará em pé sozinha. Não é desejável que o mecanismo caia durante a caminhada, enquanto algumas das pernas estão erguidas do chão, como uma mesa sem uma das pernas. Então se deve utilizar o equilíbrio estático dos corpos e nesse sentido é importante entender a ação da força gravitacional.

Toda força, classicamente, é caracterizada por três componentes básicas: módulo, direção e sentido. Mas para analisar sua ação sobre o corpo em que atua, também é necessário conhecer seu ponto de aplicação. A força da gravidade possui módulo proporcional a massa do corpo, direção vertical e sentido para baixo. No entanto a gravidade atua sobre cada ponto do corpo, assim seria difícil encontrar um único ponto de aplicação para a força da gravidade. Para tanto é apresentado outro conceito físico: o centro de gravidade.

Um corpo pode ser considerado como um conjunto de um número muito grande de partículas, cada uma com sua própria massa. A gravidade exerce força sobre cada uma dessas partículas. A força da gravidade seria então a força resultante desse conjunto de forças onde o ponto de aplicação se comporta como se concentrasse toda a massa do corpo. Esse ponto é denominado centro de gravidade.

A força da gravidade atuando sobre o corpo “tenta” aproximar o centro de gravidade o máximo possível do solo, então o corpo se não estiver estável, se desloca (cai) até encontrar uma posição estável. Por sua vez um corpo está em uma posição estável, ou em equilíbrio, quando a reta vertical que passa por seu centro de massa intersecta a base de apoio do corpo. Essa forma de estabilidade é chamada de equilíbrio estático.

A base de apoio de um objeto é uma superfície resultante da ligação entre os pontos de apoio do objeto. Um ponto de apoio é qualquer ponto do objeto que esteja em contato com o solo ou com qualquer outro objeto estável (ASTOLFO, FERRARI e FERRARI, 2007).

Dessa forma para se construir um mecanismo com pernas que se mantenha equilibrado em todo movimento (caminhada), deve-se garantir que quando algumas das pernas estão erguidas, a projeção ortogonal do centro de massa ainda esteja dentro da base de apoio do mecanismo. Determinar o centro de massa de um mecanismo que possui uma forma complexa e partes feitas com materiais de densidades diferente não é tão fácil. No entanto, não é necessário saber a posição exata do centro de gravidade, é necessário saber apenas a posição da projeção ortogonal do centro de massa, que é algo mais fácil de determinar.

Os mecanismos que possuem pernas (Fig. 1) possuem alguma forma de simetria em sua estrutura, principalmente se seu sistema de locomoção foi inspirado em algum animal. Assim seu centro de massa está localizado ao longo da linha de simetria, o que também reduz consideravelmente a complexidade do problema. Nesses casos o centro de massa pode estar muito próximo ao centro geométrico do mecanismo.



Figura 1 – Exemplos de protótipos que caminham através de pernas.

Enquanto o conjunto de pernas necessárias para um passo está erguido, a base de apoio do mecanismo de ser grande o suficiente para garantir que a projeção do centro de gravidade permaneça dentro dela mesmo que o deslocamento das pernas provoque um deslocamento do centro de gravidade. Para atender essa exigência, há duas estratégias simples: a primeira é construir mecanismos com um maior número de pernas e

combiná-las de forma a maximizar a base de apoio; a segunda é construir mecanismos que possuem pés com maior área de contato com o solo, isto é, pés maiores que aqueles necessários aos mecanismos com um maior número de pernas.

Além dos aspectos físicos do movimento, deve-se considerar a estrutura do mecanismo e como o movimento será gerado. Os animais, para se locomoverem, utilizam um grande número de músculos independentes que operam a geometria complexa do esqueleto.

No entanto, em comparação aos animais, o kit LEGO dispõe de recursos limitados para a construção dos mecanismos. Para a construção da estrutura são disponíveis vigas, blocos e eixos e para a geração de movimento, apenas motores.

Deve-se projetar estruturas que transformam o movimento rotativo dos motores em movimentos mais naturais das pernas. Quanto mais o movimento do robô se assemelha com a movimentação natural dos seres vivos, mais complexa é sua construção e execução. Para a construção de mecanismos com sistema MINDSTORMS é necessário encontrar soluções mais simples. Os principais recursos de montagem são estruturas que combinam engrenagens com vigas ou eixos.

Mecanismos com seis pernas

Dentre os mecanismos que caminham através de pernas há o grupo dos que possuem seis pernas, que são interessantes por sua alta estabilidade durante a caminhada. Esse sistema de locomoção está presente na natureza e seus representantes são os insetos, como as formigas, as baratas e os besouros.

Caminhar através de seis pernas oferece grande equilíbrio durante quase todo o movimento. A forma mais comum de caminhada com seis pernas é a marcha de oposição com tríplice apoio em forma triangular, como mostra a Fig. 2.

A figura representa um mecanismo de seis pernas. O corpo do mecanismo é representado pela elipse e o ponto em seu centro marcado com as letras CG é o centro de gravidade. Os círculos representam os “pés” do mecanismo, sendo os escuros os pés que estão em contato com o solo e os claros são os pés suspensos. As linhas pontilhadas delimitam a base de apoio.

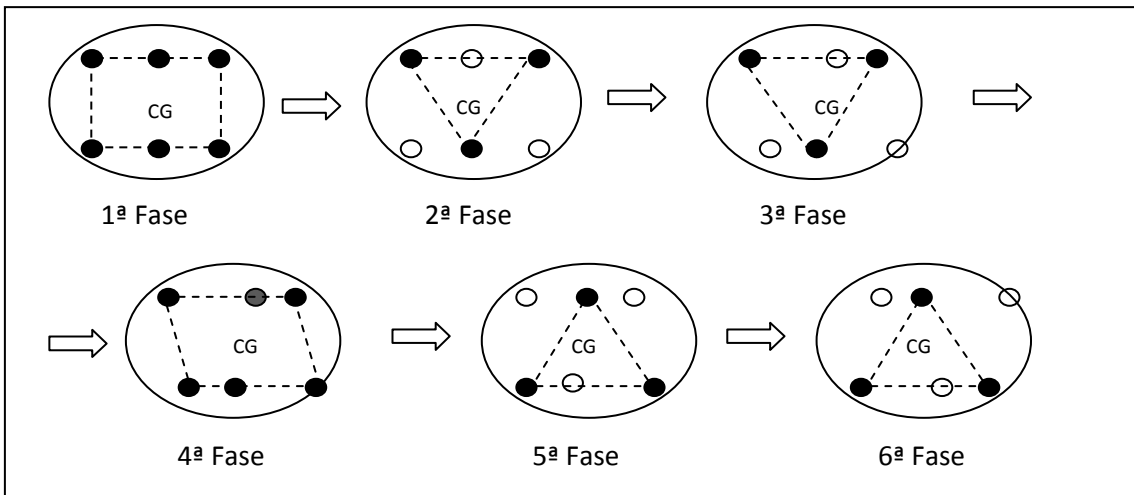


Figura 2 – Esquema de movimentação de marcha de oposição de tríplice apoio, onde os círculos pretos representam os pés de apoio e os círculos brancos são os pés suspensos.

O movimento está dividido em seis fases:

- 1ª Fase: os seis pés estão em contato com o solo;
- 2ª Fase: são erguidos três pés de forma alternada, de modo que os pés de apoio formem um triângulo;
- 3ª Fase: os pés suspensos são levados para a frente e, em seguida, são abaixados até atingirem o solo novamente;
- 4ª Fase: as pernas são abaixadas ao solo;
- 5ª Fase: são erguidas as pernas que não foram erguidas anteriormente;
- 6ª Fase: as pernas erguidas são movimentadas para frente.

Observa-se que o centro de gravidade está sempre posicionado dentro da base de apoio. Para esse tipo de mecanismo a área de contato do pé com o solo pode ser muito reduzida em comparação a mecanismos com menos pernas, ou seja, os mecanismos desse tipo podem ter pés pequenos, comparativamente a outros sistemas, sem perderem a estabilidade. Além desses aspectos, esse tipo de caminhada com seis pernas permite uma fácil implementação, pois permite que as pernas sejam movimentadas em conjunto.

Como o movimento das pernas deve ser obtido através de motores do kit LEGO, usar um motor para movimentar cada perna torna-se inviável, primeiro, porque necessitaria de um grande número de motores e geralmente há apenas três; segundo, porque a programação torna-se bem mais trabalhosa.

Com base na idéia de movimentar as pernas em conjunto, pode-se utilizar apenas dois motores para movimentar todas as pernas do protótipo. Cada motor irá movimentar três pernas que estão de um mesmo lado do robô. Isso possibilita a realização de curvas durante o movimento através da diferença de rotação entre os motores.

Mecanismos com quatro pernas

O sistema de caminhada utilizando quatro pernas também é comum na natureza: a grande maioria dos vertebrados terrestres possui quatro patas. Cães, cavalos, elefantes e leões são exemplos de animais quadrúpedes.

Construir mecanismos que caminham utilizando quatro pernas significa uma economia e simplificação no mecanismo, em comparação com os mecanismos de seis pernas, o movimento se torna mais simples e a estrutura de fácil construção. No entanto, o equilíbrio se torna de mais difícil obtenção, pois se diminui o número de pontos de apoio do mecanismo, sendo necessário aumentar a área de contato com o solo, ou seja, aumentar o tamanho dos pés.

A forma mais comum de caminhada com quatro pernas é a marcha de oposição, onde as pernas em diagonal, isto é, a perna dianteira de um lado com a perna traseira do outro, são erguidas ao mesmo tempo. Essa forma de caminhada é semelhante a caminhada com seis pernas estudada anteriormente, no entanto, ela implica em um aumento da área de contato dos pés para manter o centro de gravidade dentro da base de apoio.

A Fig. 3 representa esquematicamente essa marcha de oposição para o movimento com quatro pernas, para um protótipo idealizado.

Na figura, o movimento é representado em seis fases:

- 1ª Fase: o mecanismo está com as quatro pernas em contato no chão;
- 2ª Fase: duas pernas em diagonal são erguidas, de forma manter o centro de gravidade dentro da base de apoio;
- 3ª Fase: as pernas erguidas são levadas para frente;
- 4ª Fase: as pernas são abaixadas ao solo;
- 5ª Fase: são erguidas as pernas que não foram erguidas anteriormente;
- 6ª Fase: as pernas erguidas são movimentadas para frente.

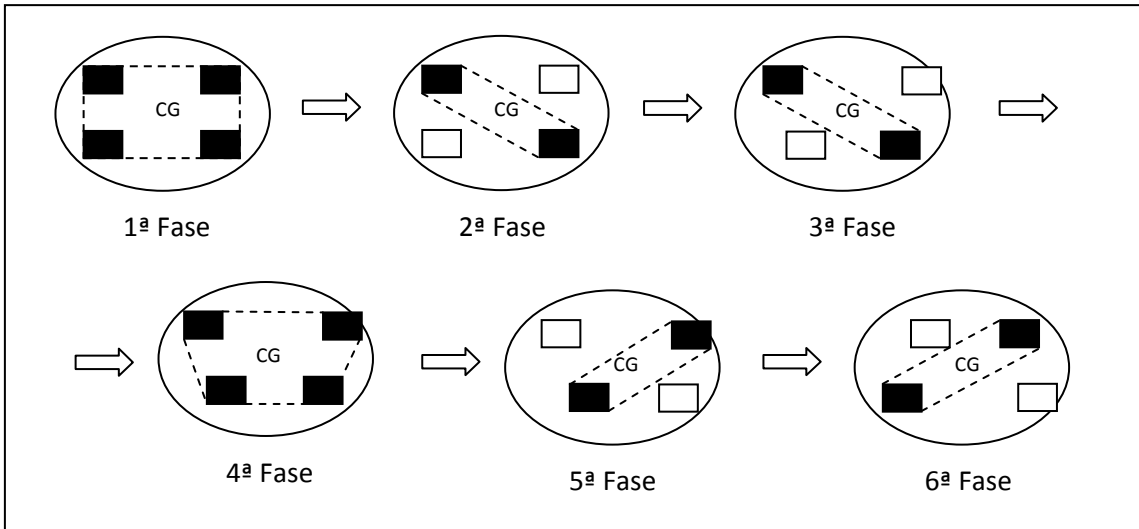


Figura 3 – Esquema de caminhada de marcha para quatro pernas, onde os retângulos pretos representam os pés de apoio e os retângulos brancos são os pés suspensos.

Depois da última fase, o movimento é repetido a partir da primeira fase novamente. Da mesma forma que nos mecanismos de três pernas, esses mecanismos podem ser construídos de forma a obter o movimento das pernas apenas com dois motores. Cada motor irá movimentar duas pernas do mesmo lado do mecanismo e a diferença de fase pode ser obtida por um conjunto de engrenagens.

Mecanismos com ‘muitas’ pernas

O número de pernas não precisa ser limitado aos tipos mais comuns. Na natureza, existem animais com o mais variados números de pernas: aracnídeos possuem oito patas, alguns crustáceos possuem dez, e há as centopéias que podem apresentar desde dezenas a centenas de pernas.

Cada forma de caminhar dos animais está associada aos seus diferentes hábitos e aos ambientes diferentes em que eles vivem. Dessa maneira, na construção de mecanismos, o número de pernas pode estar associado à finalidade do robô e, principalmente, a forma de caminhar que se espera dele. De forma geral, quanto mais pernas um mecanismo possui, mais suave é seu movimento.

Quando se deseja um movimento suave, o mecanismo de Theo Jansen é indicado. Esse mecanismo utiliza de vigas e manivelas para modificar o movimento rotativo dos motores, conseguindo um movimento melhorado. Esse mecanismo foi criado pelo

artista e escultor cinético holandês Theo Jansen, de quem herda seu nome (INGRAM, 2004).

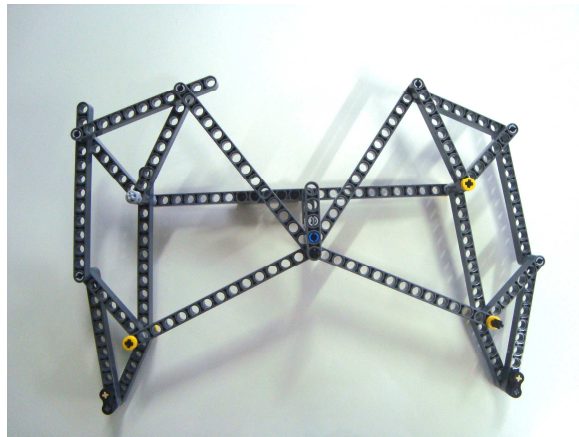


Figura 4 – Par de pernas do mecanismo de Theo Jansen construído em LEGO®

Nesse mecanismo as pernas são associadas em pares, uma perna dianteira e uma traseira, que se movimentam juntas. Para uma boa configuração, o mecanismo precisa associar três pares de pernas, com uma defasagem de um terço da rotação de uma para outro, para cada lateral do protótipo, totalizando doze pernas.

Mecanismos Bípedes

Quando se trata de mecanismos capazes de andar, os que caminham sobre duas pernas são, sem dúvida, o grupo mais difícil de construir. No entanto, a dificuldade não reside na tentativa de criar uma estrutura de duas pernas que se movimentam, mas sim em criar uma estrutura que mantenha o equilíbrio em todas as fases do movimento.

Em geral, quando um mecanismo possui duas pernas, a projeção do centro de gravidade se localiza no meio da base de apoio formada apenas por seus dois pés. Então quando se ergue um dos pés, a base de apoio reduz seu perímetro, restando apenas a área do pé de apoio. Assim, a projeção do centro de massa pode não estar mais dentro da base de apoio do mecanismo e o mecanismo não estará em equilíbrio durante o movimento.

Dessa maneira, duas estratégias podem ser utilizadas para garantir o equilíbrio em todas as fases do movimento: aumentar a área do pé de apoio para que mesmo que um pé esteja erguido, o centro de massa esteja dentro do pé de apoio; ou provocar o deslocamento do centro de massa para cima do pé de apoio, através de um

deslocamento de massa. A segunda estratégia tenta reproduzir o comportamento de animais bípedes, como o homem.

Seguindo essas duas estratégias, temos dois tipos de mecanismos bípedes mais comuns: os que possuem pernas que se entrelaçam e os que deslocam o centro de gravidade.

De acordo com Benedettelli (2008), os robôs de pernas entrelaçantes são os de abordagem mais simples que se pode adotar para um bípede. Esses mecanismos geralmente possuem pés grandes em formato de “U”. O nome se deve ao fato de que enquanto caminham os seus pés ficam se entrelaçando, como mostra a Figura 5.

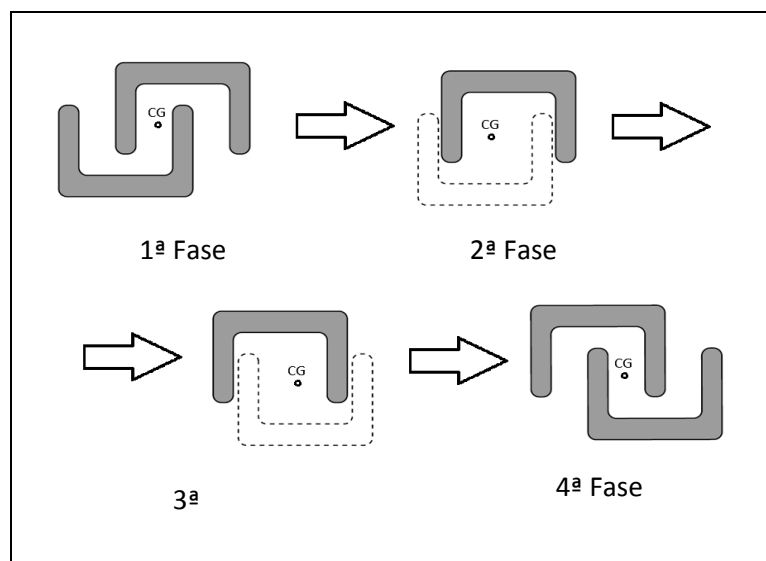


Figura 5 – Esquema de caminhada de mecanismos bípedes de pernas entrelaçantes (adaptado de BENEDETTELLI, 2008).

Observa-se que com essa estratégia, o centro de gravidade do robô está sempre dentro da base de apoio. Esse tipo de mecanismos depende essencialmente do tamanho dos pés para garantir sua estabilidade.

Os mecanismos que deslocam seu centro de gravidade são substancialmente mais difíceis de construir. Eles, enquanto erguem uma das pernas, deslocam uma parte de sua estrutura que concentra muita massa, o que geralmente pode ser o “corpo” do mecanismo, para centralizar acima da perna de apoio. Dessa forma o mecanismo consegue trazer o centro de gravidade para dentro da base de apoio forma unicamente pelo pé em contato com o solo. A Fig. 6 demonstra essa forma de caminhada.

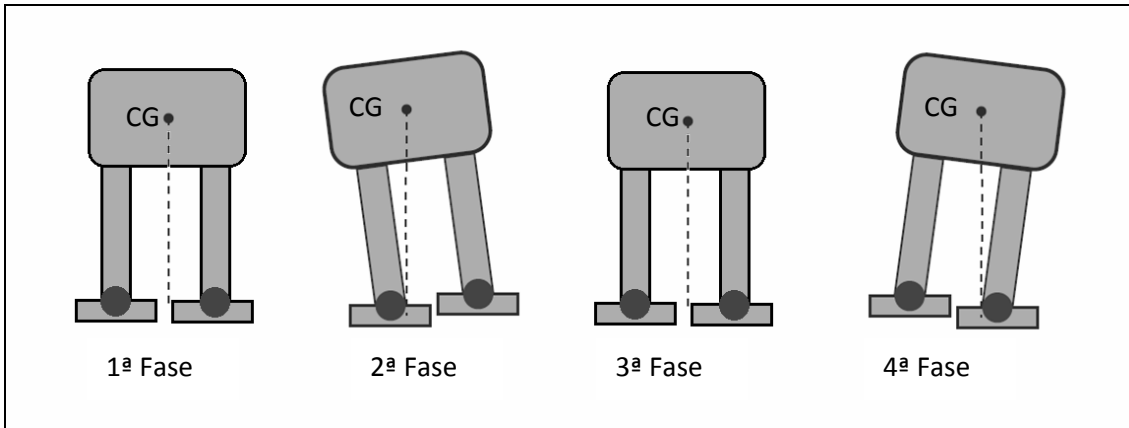


Figura 6 – Esquema de caminhada de bípodes que deslocam o centro de massa (adaptado de BENEDETTELLI, 2008).

Experimentos

Nesta seção, são apresentados alguns de robôs autônomos capazes de se locomover através de pernas. Procurou-se apresentar ordenadamente pelo menos um robô que exemplifique cada um dos mecanismos discutidos nas seções anteriores. O primeiro é uma aranha robô, que possui oito pernas, mas que locomove como robôs quadrúpedes. O segundo é um robô de doze pernas que utiliza o mecanismo de Theo Jansen. Então, o próximo protótipo apresenta um exemplo de mecanismo de seis pernas. Em seguida, é apresentado um mecanismo de quatro pernas. Por fim, são apresentados dois mecanismos bípodes para ilustrar as duas classes apresentadas anteriormente.

Aranha robô

Este protótipo é uma tentativa de se reproduzir com mínima fidelidade possível, a anatomia e a locomoção de uma aranha (Fig. 7). Nele utiliza-se apenas um motor para transmitir o movimento para as oito pernas e o “brick” NXT não é acoplado ao corpo do robô.

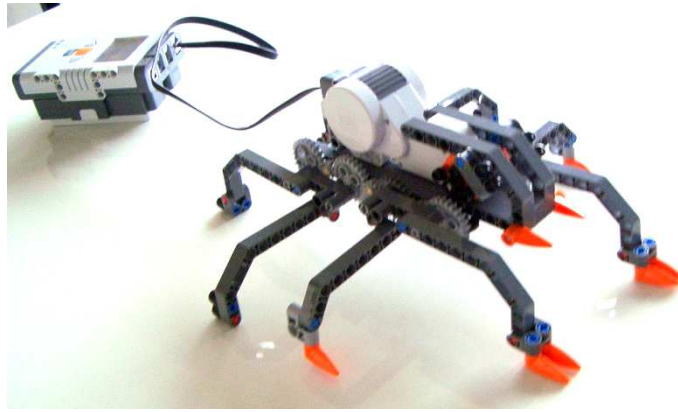


Figura 7 – Aranha robô

A física do caminhar se baseia num sistema de movimentação das patas em diagonal (marcha de oposição) onde as patas vizinha frontais de um lado se movimenta juntamente com as patas vizinhas posteriores do lado oposto, que foi obtido utilizando oito engrenagens 24t (engrenagens de 24 dentes). Esse modo de caminhar é muito semelhante ao modo apresentado sobre os mecanismos de quatro pernas.

As engrenagens foram conectadas em pares por vigas de cinco furos, nas quais foram adicionas vigas angulares, de forma que o robô ficasse apoiado sobre estas vigas, tornando-se estas as patas. Ainda foram adicionadas peças que aumentavam a área de contato e o atrito com o solo.

Na realidade, como os pares vizinhos de pernas se movimentam em conjunto, esse um robô pode ser considerado um mecanismos de quatro pernas, cada uma compostas por duas patas da aranha. Assim, esse sistema de movimentação difere um pouco da locomoção natural das aranhas, sendo necessária maior independência das pernas para uma reprodução mais fidedigna.

Crawler NXT

Com um sistema de caminhar diferente dos demais, este protótipo possui doze pernas do mecanismo de Theo Jansen. As pernas são movimentadas por dois motores, sendo um motor e seis pernas para cada lado do robô (Fig. 8). Esse robô, além de caminhar para frente, é capaz de realizar curvas, através da diferença de rotação entre os motores.

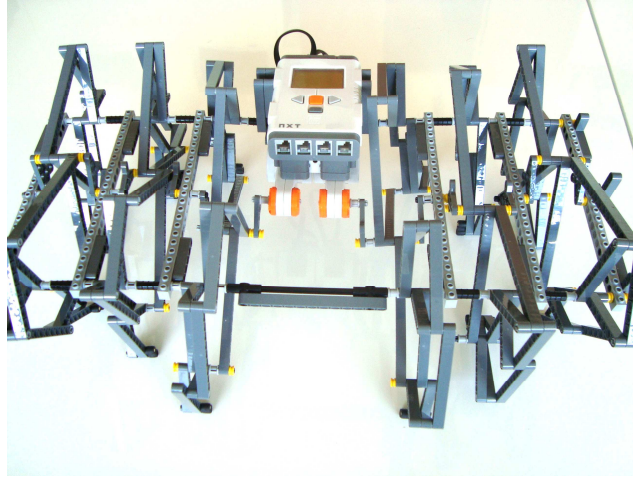


Figura 8 – Crawler NXT

Como foi dito, para um caminhar mais suave, os pares pernas desse mecanismo necessita ter uma defasagem de um terço de volta, no entanto, as peças do kit LEGO são projetadas para se adaptarem mais facilmente a conexões perpendiculares, então a defasagem da rotação das pernas desse protótipo é de um quarto de volta. Essa diferença é um problema de montagem que ainda deve ser superado.

Hexápode

Este protótipo ilustra o tipo locomoção com seis pernas. Suas pernas são compostas por eixos conectados à engrenagens e seu movimento é obtido utilizando apenas um motor (Fig. 9).

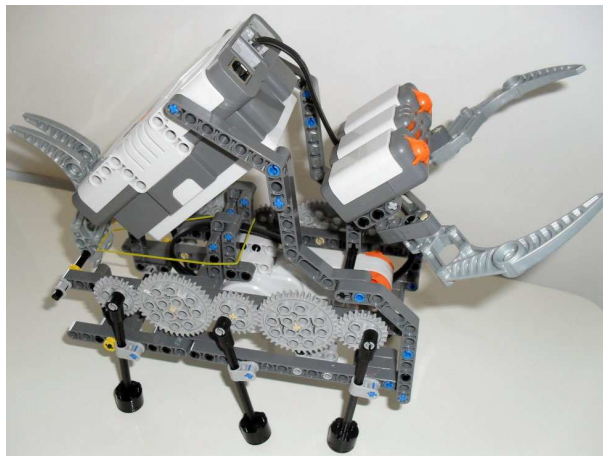


Figura 9 – Robô hexápode

Devido à utilização de apenas um motor esse protótipo não realiza curvas. Para que o robô possa realizar curvas, pode-se utilizar o mesmo sistema do Crawler NXT, conectando três pernas de um lado a um motor e as outras três pernas a outro motor. Fazendo os motores girarem em velocidades ou até mesmo direções diferentes, o robô consegue fazer curvas.

Quadrúpede

Este protótipo de quatro pernas utiliza marcha de oposição para a caminhada. Esse robô (Fig. 10a), como o anterior, possui apenas um motor para gerar o movimento das pernas, assim também não realiza curvas.

Bípede “Quasimodo”

Este protótipo é um exemplo de um robô de pernas entrelaçantes (Fig. 10b). O modelo é apresentado por Benedettelli (2008). O robô possui um único motor que movimenta as pernas e constitui a parte mais fixa do mecanismo. O “brick” é conectado ao robô de forma a permitir um pequeno deslocamento durante a caminhada, para facilitar o equilíbrio. O robô possui um sensor ultra-sônico, no entanto, como o foco foi apenas a forma de caminhar, para este protótipo o sensor tem apenas função estética.

“Omni-Bípede”

Este robô é um exemplo bem sofisticado de mecanismo bípede capaz de deslocar seu centro de massa (Fig. 10c). Esse modelo também foi proposto por Benedettelli (2008). Neste protótipo, cada perna é movida por um motor de modo a obter dois movimentos coordenados: o “tornozelo” é dobrado para deslocar o centro de gravidade do robô (CG) e o pé balança para frente e para trás, para completar o passo.

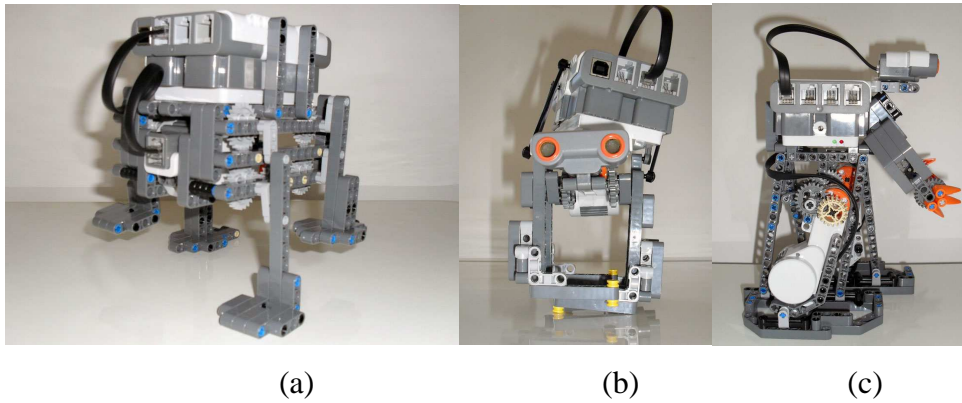


Figura 10 – (a) Quadrúpede (b) Quasimodo (c) Omni-Bípede

Conclusões

Este trabalho apresentou algumas formas artificiais de caminhar, por meio da construção de mecanismos dotados de pernas com o kit Mindstorms NXT[®], levando em conta diferentes estágios e variadas complexidades e geometrias, enfocando a física do caminhar, principalmente a respeito do deslocamento de centro de massa de estruturas durante o movimento. Foram produzidos ainda, protótipos com 6, 4 e duas pernas, utilizando diferentes combinações de montagem e programação.

Referências

ASTOLFO, D.; FERRARI, M.; FERRARI, G., Building Robots With LEGO[®] MINDSTORMS[®] NXT, Elsevier, 2007.

BENEDETTELLI, D. Creating Cool Mindstorms[®] Robots, APRESS, 2008.

INGRAM, A. J., Numerical Kinematic and Kinetic Analysis of a New Class of Twelve Bar Linkage for Walking Machines, Dissertation, Magister Ingenieriae, Rand Afrikaans University, 2004.

INGRAM, A. J., A New Type of Mechanical Walking Machine, Dissertation, Doctor Ingenieriae, Rand Afrikaans University, 2006.

KELLY, J. F., LEGO[®] MINDSTORMS[®] NXT-G - Programming Guide, APRESS, 2007.