



INSTITUTO
SUPERIOR
TÉCNICO

ROBÓTICA

**Licenciatura em Engenharia Electrotécnica e
Computadores
Ramo de Controlo e Robótica**

Relatório do Seminário



Nelson Gonçalves	45232
Pedro Silva	45258

Índice

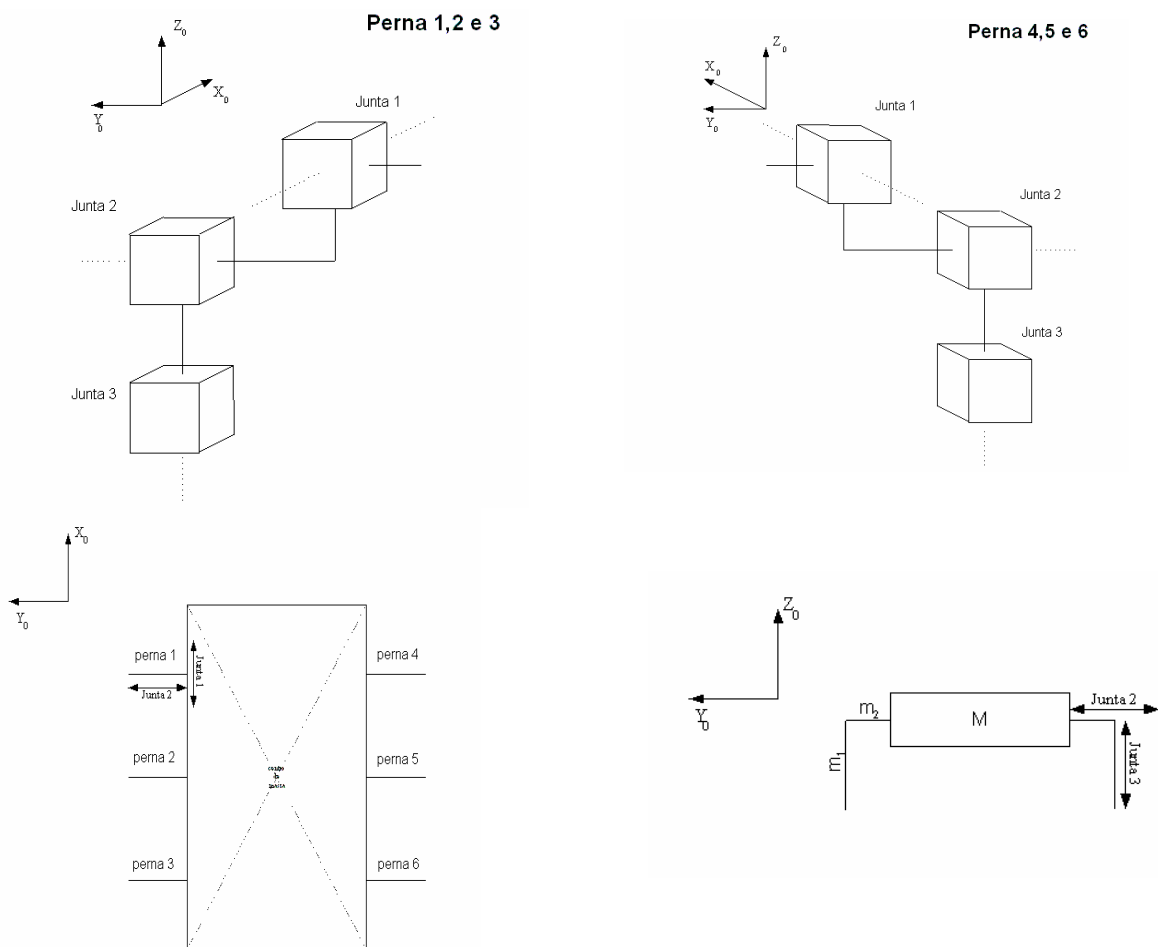
Introdução	3
Robot hexa-bípede	3
Modelo e Cinemáticas	4
Junta 1:	4
Junta 2:	4
Junta 3:	4
Estratégias de movimento	5
Definição 1	5
Definição 2	5
Exemplos de movimentos:	6
Bípede	8
Fórmulas da cinemática inversa e directa	8
Modelo do bípede:	9
Modo de andar	10
Cálculo das trajectórias no espaço cartesiano	11
Simulação	13
Apêndice A	15
Bibliografia:	16

Introdução

O objectivo deste seminário foi tentar perceber melhor a estrutura dos robots múltípedes, problemas associados e respectivas soluções. Começámos por dar um exemplo de robots hexa-bípedes, para o qual propomos uma solução para a estrutura das patas. Como o objectivo destes robots é a locomoção em terreno difícil, de seguida analisámos os tipos de andar para terreno difícil propostos em [1]. De seguida tentou-se modelar e controlar um robot bípede. Como fonte de inspiração usou-se o robot bípede proposto em [2]. Em [3] é proposta uma lei de controlo para um duplo integrador, que se usou para controlar o bípede desenvolvido e se comparou os resultados com o controlo “clássico”. No final é descrito um robot bípede passivo que pode servir como motivação para o estudo da locomoção em bípedes. Este foi proposto por [5].

Robot hexa-bípede

Para o robot hexa-bípede propusemos a seguinte configuração:



Cada perna é constituída por três juntas prismáticas. A junta 3 levanta e coloca o pé da respectiva pata no chão, a junta 2 permite regular a distância da perna ao corpo, e a junta 1 serve para movimentar a perna para a frente e para trás. Para simplificar a análise, admitimos que a massa M do corpo é muito maior que a massa das pernas, $(m_1 + m_2)$, não tendo influência significativa sobre a posição do centro de massa. Como hipótese simplificada, colocámos o centro de massa coincidente com o centro do corpo. Esta hipótese poderá não se verificar na prática.

Modelo e Cinemáticas

O modelo das pernas é linear e totalmente desacoplado, uma vez que apenas temos juntas prismáticas. Assim a dinâmica do modelo é obtida aplicando a lei de Newton, resultando para cada junta as seguintes equações, em que β_i ($i = 1,2,3$) é o atrito existente na junta i e F_i ($i = 1,2,3$) é a força que a junta i tem de exercer.

Junta 1:

$$(m_1 + m_2)\ddot{d}_1 + \beta_1 \dot{d}_1 = F_1, \text{ quando a pata não se encontra em contacto com o chão.}$$

Sendo m_1 e m_2 as massas dos dois troços das juntas 2 e 3.

$$\left(\frac{M}{K}\right)\ddot{d}_1 + \beta_1 \dot{d}_1 = F_1, \text{ quando a pata se encontra em contacto com o chão, sendo } K \text{ o}$$

n° de pernas que se encontram em contacto com o chão e a fazerem o mesmo movimento que esta junta.

Junta 2:

$$(m_1 + m_2)\ddot{d}_2 + \beta_2 \dot{d}_2 = F_2, \text{ quando a pata não se encontra em contacto com o chão.}$$

$$\left(\frac{M}{K}\right)\ddot{d}_2 + \beta_2 \dot{d}_2 = F_2, \text{ quando a pata se encontra em contacto com o chão e havendo}$$

K pernas que se encontram em contacto com o chão e a fazerem o mesmo movimento que esta junta.

Junta 3:

$$m_1 \ddot{d}_3 + \beta_3 \dot{d}_3 + m_1 g = F_3, \text{ quando a pata não se encontra em contacto com o chão,}$$

sendo g a aceleração da gravidade.

$$\left(\frac{M}{K}\right)g = F_3, \text{ quando a pata se encontra em contacto com o chão e havendo } K \text{ pernas}$$

que se encontram em contacto com o chão.

Como as equações de cada junta são semelhantes, os actuadores de cada junta terão de ter aproximadamente o mesmo binário. De notar que as equações são variantes no tempo, conforme exista ou não contacto com o chão da perna em questão, e também que as

pernas são independentes dinamicamente entre si. Como a dinâmica das pernas é linear e desacoplada usou-se um controlador proporcional para as duas primeiras juntas e um controlo também proporcional em que se incluiu o termo da gravidade para a terceira junta. Desprezámos a dinâmica dos actuadores, pois considerámos que era muito mais rápida que a dinâmica dos movimentos exigidos às juntas.

Estratégias de movimento

O principal desafio na locomoção em terreno difícil consiste em determinar o local aonde colocar as patas. Se existir informação sobre aonde colocar as duas patas da frente então, as restantes podem ser colocadas muito próximas da posição das patas que estão à sua frente. A estratégia de movimento é então do género FTL (“follow the leader”).

Em [1] são propostas duas definições para classificar o tipo de andar, que nós adoptámos:

Definição 1

Margem de estabilidade a falhas, S_f : É o número de pernas que se devem manter no chão durante o andar de modo a que existindo uma falha na movimentação de uma perna, o movimento das restantes não é afectado.

O robot não se consegue suportar se $S_f < 0$. Se $S_f = 0$, em caso de falhar uma perna o robot cai, e se $S_f \geq 0$, o robot consegue suportar-se se uma perna falhar. Uma perna falha quando não é capaz de suportar a parte do corpo que lhe compete. No nosso robot, a perna falha se a junta 3 falhar ou o chão não conseguir suportar o pé.

Definição 2

Ponto crítico: Quando o hexa-bípede tem as seis pernas no chão e vai levantar duas, o ponto crítico é o ponto que resulta da intersecção das diagonais do quadrado formado pelas quatro pernas que ficam no chão.

O ponto crítico é para onde o centro de massa se deve colocar de modo a que o robot consiga equilibrar-se com as pernas que ficam no chão.

Com o tipo de perna proposto, o bípede não consegue rodar sobre si próprio. Assim só foi estudado o andar em frente e para o lado.

No modo de andar em frente, o hexa-bípede começa por levantar as duas pernas de trás colocando-as perto da posição das pernas do meio. As do meio colocam-se perto da posição das pernas da frente. As pernas da frente colocam-se nas posições escolhidas. Então as juntas 1 de cada perna puxam o corpo para a frente.

O modo de andar para o lado não varia muito, do modo andar em frente, pois começa-se por levantar as duas pernas de trás, movendo depois a junta dois para o lado que se pretende fazer o deslocamento, e assim sucessivamente para os restantes pares de pernas. Quando estiverem todas as pernas em posição o corpo é movido com o recurso da junta 2, de todas as pernas que estiverem no chão.

Se quisermos andar em diagonal, não é mais do que fazer uma combinação dos dois movimentos.

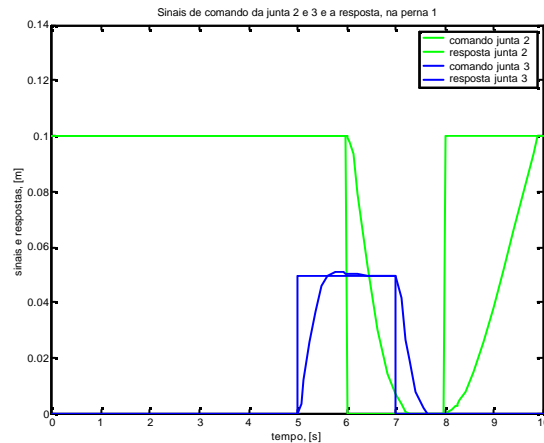
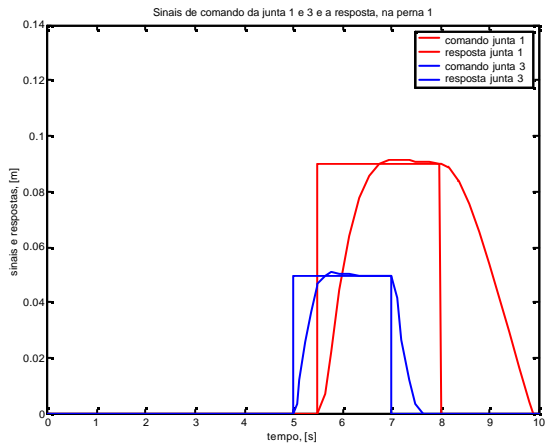
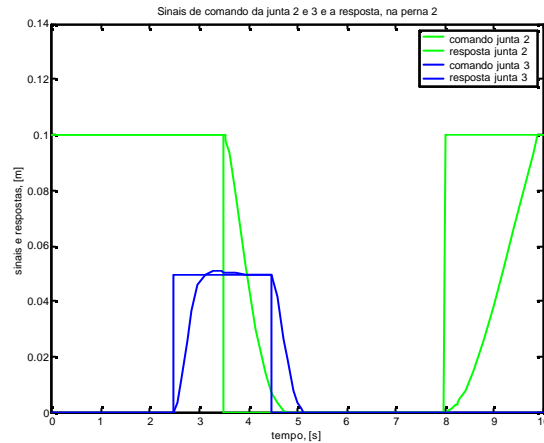
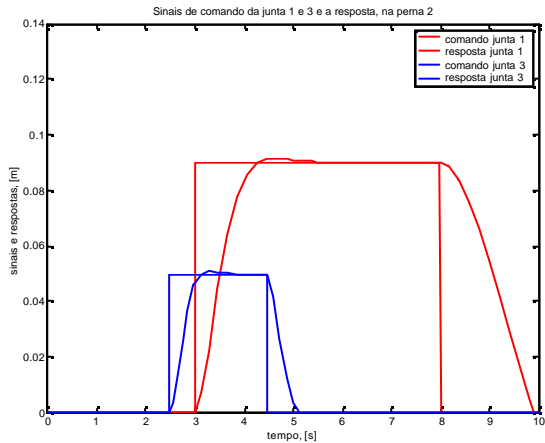
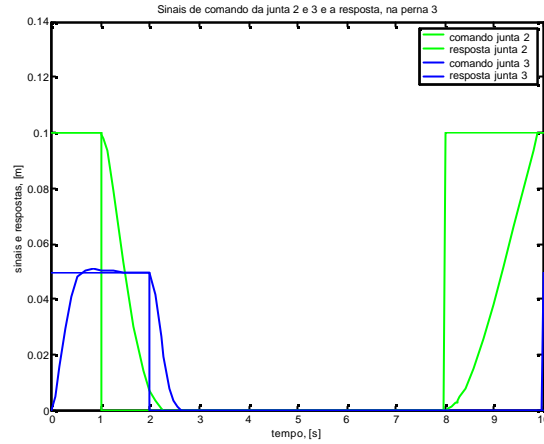
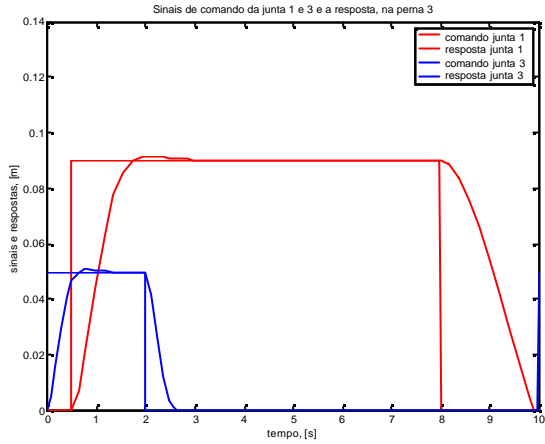
Em ambos os tipos de andar existem sempre quatro pernas no chão, no caso de uma falhar enquanto se está a movimentar passam a existir três pernas no chão, que continuam a

garantir a estabilidade do robot. Assim, para este tipo de andar $S_f \geq 0$, e no caso de uma perna falhar $S_f = 0$, o que significa que o andar é tolerante a falhas. O ponto crítico neste tipo de andar coloca-se sempre no centro do corpo, e assim o robot não cai.

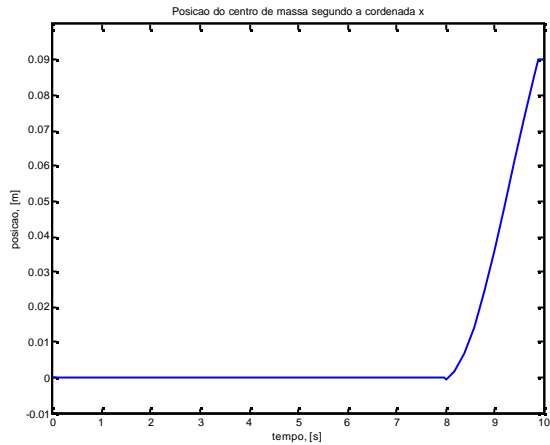
Exemplos de movimentos:

Andar em frente:

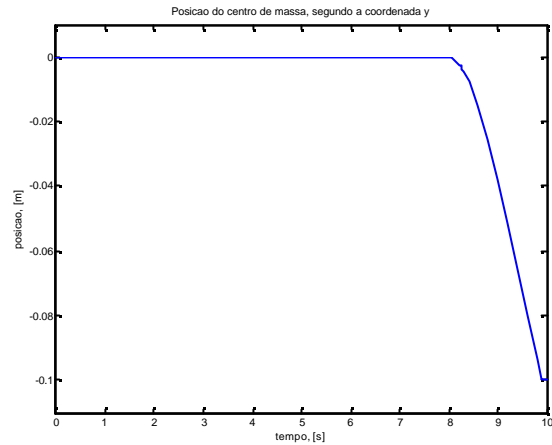
Andar para o lado:



A junta 2 mantém a posição em 0.05 m.



A junta 1 permanece em 0.05 m

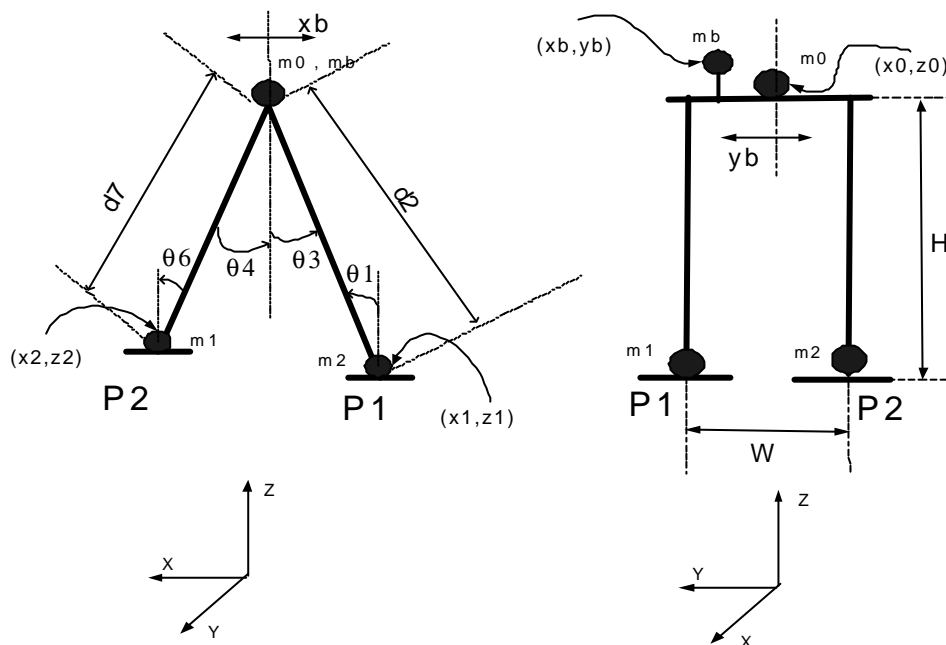


Estes resultados servem apenas como referência para determinar a sequência de comandos a fornecer aos respectivos pares de pernas. O modelo usado na simulação não inclui a dinâmica dos actuadores pois esta varia de actuator para actuator e não era o objectivo desta simulação. Estes resultados servem para mostrar a dependência dos movimentos de uma junta em relação às outras e também a dependência do movimento de uma perna em relação às outras, obtendo-se assim um esforço conjugado no sentido da realização do movimento global do corpo. Estas sequências de comando para cada par de pernas foram determinadas teoricamente e ajustadas experimentalmente conforme a respostas aos respectivos comandos.

Bípede

Para se melhor perceber a locomoção de um bípede, adaptou-se o modelo proposto em [2]. No modelo proposto existe um peso de balanço que serve para corrigir imperfeições de inclinação do torso do bípede e melhor controlar o centro de gravidade do bípede. O bípede por nós proposto consiste apenas na adição de mais um grau de liberdade ao peso de balanço, permitindo-lhe mover-se segundo o eixo dos xx' . O bípede consiste então em duas juntas prismáticas nos joelhos, duas juntas de revolução nas ancas e outras duas nos tornozelos. Existem ainda mais duas juntas prismáticas que servem para movimentar o peso de balanço.

Fórmulas da cinemática inversa e directa



Na figura mostra-se um esquema do robot, visto de lado e de frente, são visíveis as variáveis de junta e as variáveis do espaço cartesiano. Estas são, respectivamente:

$$\mathbf{q} = [\theta_1 \ d_2 \ \theta_4 \ d_5 \ d_7 \ d_8]^t \quad \mathbf{p} = [x_2 \ z_2 \ x_0 \ z_0 \ x_b \ y_b]^t$$

Como $\theta_3 = \theta_1$ e $\theta_4 = \theta_6$, estas variáveis não fazem parte das variáveis de junta, na análise. No entanto como correspondem a juntas que vão ser actuadas, vão receber a mesma referência que é dada às juntas de θ_1 e θ_4 .

A cinemática directa é calculada por inspecção da figura, uma vez que a geometria do problema é muito simples. Na análise da cinemática x_1 , z_1 e y_0 são constantes durante

um ciclo do andar, uma vez que se considera que é a perna 1 que é a perna de suporte e perna de balanço é perna 2. Assim, a cinemática do bípede é a seguinte:

$$\begin{aligned}x_2 &= x_1 + d_2 \sin \theta_1 + d_7 \sin \theta_4, \\z_2 &= z_1 + d_2 \cos \theta_1 - d_7 \cos \theta_4, \\x_0 &= x_1 + d_2 \sin \theta_1, \\z_0 &= z_1 + d_2 \cos \theta_1, \\x_b &= x_0 + d_5, \\y_b &= y_0 + d_8,\end{aligned}$$

A cinemática inversa, tal como a cinemática directa é obtida por inspecção da figura. As equações da cinemática inversa são:

$$\begin{aligned}\theta_1 &= \text{tg}^{-1}(x_0 - x_1)/(z_0 - z_1), \\d_2 &= \sqrt{(x_0 - x_1)^2 + (z_0 - z_1)^2}, \\\theta_4 &= \text{tg}^{-1}(x_2 - x_0)/(z_2 - z_0), \\d_5 &= x_b - x_0, \\d_7 &= \sqrt{(x_2 - x_0)^2 + (z_2 - z_0)^2}, \\d_8 &= y_b - y_0,\end{aligned}$$

O jacobiano relaciona a velocidade no espaço cartesiano com a velocidade no espaço de junta. Assim : $\dot{p} = J \dot{q}$, ou seja $J = \frac{\partial p}{\partial q}$. A expressão do jacobiano é apresentada no final, em apêndice, em função das variáveis do espaço cartesiano. No entanto é de notar que este é sempre não-singular, desde que o robot não caia.

O centro de massa do bípede é encontrado da mesma forma, sendo:

$$X_{cg} = \begin{bmatrix} \frac{m_1 x_1 + m_2 x_2 + m_0 x_0 + m_b x_b}{m} \\ \frac{m_b y_b}{m} \\ \frac{m_1 z_1 + m_2 z_2 + m_0 z_0 + m_b z_b}{m} \end{bmatrix}, \text{ em que } m = m_1 + m_2 + m_0 + m_b$$

Modelo do bípede:

Para modelar o bípede usou-se o método do lagrangeano. O modelo foi derivado no espaço cartesiano e não no espaço de junta. Assim obteve-se um modelo em que as forças que actuam no bípede são forças generalizadas no espaço cartesiano, cuja relação com os binários generalizados no espaço de junta se obtêm através do jacobiano, $\tau = J^t f$.

A energia potencial U é, em função das variáveis cartesianas:

$$U = m_1 g z_1 + m_2 g z_2 + m_0 g z_0 + m_b g z_b$$

A energia cinética é :

$$\mathbf{K} = \frac{1}{2} m_2 \dot{x}_2^2 + \dot{z}_2^2 + \frac{1}{2} m_0 \dot{x}_0^2 + \dot{z}_0^2 + \frac{1}{2} m_b \dot{x}_b^2 + \dot{y}_b^2 + \dot{z}_b^2$$

\mathbf{K} pode ser expresso da seguinte forma, tendo em conta que $z_0 = z_b$:

$$\mathbf{K} = \frac{1}{2} \dot{p}^T \mathbf{M} \dot{p} \text{ em que } \mathbf{M} \text{ é a matriz das massas, } \mathbf{M} = \text{diag}\{m_2, m_2, m_0, m_0 + m_b, m_b, m_b\}$$

Assim , o modelo fica :

$$L = K - U$$

$$\frac{\partial L}{\partial p} - \frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{p}} = f$$

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{p}} = \mathbf{M} \ddot{p} + \dot{\mathbf{M}} \dot{p} \text{ , } \frac{\partial L}{\partial p} = \frac{\partial K}{\partial p} - \frac{\partial U}{\partial p}$$

$$V(p, \dot{p}) = \dot{\mathbf{M}} \dot{p} - \frac{\partial K}{\partial p} = 0$$

$$G = \frac{\partial U}{\partial p}$$

$$\mathbf{M} \ddot{p} + G = f$$

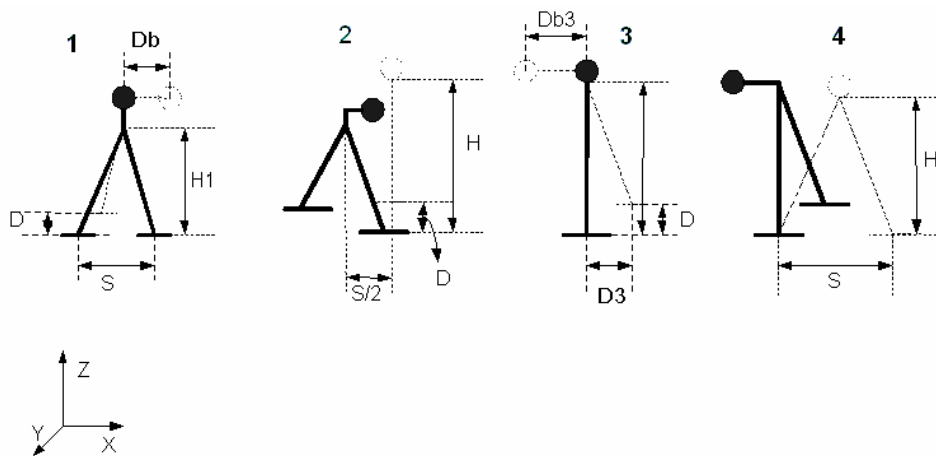
Como a matriz das massas, \mathbf{M} , é constante e a energia cinética não depende da posição, o vector V dos termos cruzados é nulo. Se quiséssemos o modelo em função dos binários generalizado bastaria multiplicar á esquerda pelo jacobiano transposto. Mas como o jacobiano é variante no tempo, obteríamos um modelo que é variante no tempo e não linear porque o jacobiano está expresso em função das variáveis do espaço cartesiano, o que seria muito mais difícil de controlar.

Modo de andar

O modo de andar do robot bípede é a característica mais importante do bípede, e em última análise determina a própria estrutura do bípede. Assim, optou-se por um tentar construir um modo de andar ligeiramente diferente do proposto em [2], que faz uso da nova junta prismática adicionada ao modelo desenvolvido em [2]. No modo de andar a perna 1 é a perna de suporte e a perna 2 a perna de balanço. O modo de andar é o seguinte:

- 1) Levanta a perna de trás (de balanço) a uma altura de D e avança-a também para a frente D . Para compensar o centro de gravidade (cg), avança com o peso de balanço Db para a frente e $W/2$ para cima da perna de suporte.
- 2) De seguida avança com a perna 2 até à perna 1, e move também o torso de modo a ter o corpo do bípede direito e alinhado com a perna de suporte. Alinha também o peso de balanço de modo a colocar o cg alinhado segundo xx' com o pé de suporte.
- 3) Avança com a perna de balanço $D3$ para a frente e o peso de balanço Db para trás.
- 4) Avança lentamente com o peso de balanço para a frente e para o meio do torso de modo a que o bípede caia sobre a perna de balanço. Avança com o torso para a frente de modo a recomençar nas condições iniciais.

A figura seguinte ilustra cada uma das fases do modo de andar.



Cálculo das trajectórias no espaço cartesiano

Para modelar as trajectórias usaram-se polinómios cúbicos, em que os pontos de via são os pontos iniciais de cada fase do andar. Sendo T_1 , T_2 , T_3 e T_4 os tempos em que terminam cada uma das 4 fases do andar as variáveis do espaço cartesiano tomam a seguinte forma:

$$\mathbf{p}(0) = [x_2^0 \quad z_2^0 \quad x_0^0 \quad H_1 \quad x_0^0 \quad 0]^t, \quad \mathbf{p}(T_1) = [x_2^0 + D \quad z_2^0 + D \quad x_0^0 \quad H_1 \quad x_0^0 + Db \quad W/2]^t,$$

$$\mathbf{p}(T_2) = [x_1 \quad z_2^0 + D \quad x_1 \quad H \quad x_1 \quad W/2]^t, \quad \mathbf{p}(T_3) = [x_1 + D_3 \quad z_2^0 + D \quad x_1 \quad H \quad x_1 - Db_3 \quad W/2]^t$$

$$, \quad \mathbf{p}(T_4) = [x_1 + S \quad z_2^0 \quad x_1 + S/2 \quad H_1 \quad x_1 + S/2 \quad 0]^t.$$

Os parâmetros das trajectórias são calculados recorrendo às condições de equilíbrio do bípede, às velocidades que cada junta é capaz de suportar e às forças aplicadas ao bípede. No que diz respeito às forças assume-se que o pé de suporte não escorrega durante o andar. Isto pode ser conseguido usando solas mais aderentes. Também se assume que as forças devido ao impacto, na última fase do andar, são desprezáveis. Esta hipótese é pouco

razoável, mas como se pode controlar o peso de balanço segundo xx' pode-se controlar a velocidade com que o bípode cai e assim a força no momento do impacto.

Os comprimentos D , D_3 , Db e Db_3 e também o tamanho do passo, S , têm que verificar as seguintes restrições:

$$d_{2,7\min} \leq D, D_3 \leq d_{2,7\max}, \quad d_{5\min} \leq Db, Db_3 \leq d_{5\max}, \quad d_{8\min} \leq W/2 \leq d_{8\max}$$

$$q_{3,4\min} \leq \arcsin\left(\frac{S-D}{d_{2,7}}\right), \text{ durante a fase 2}$$

$$q_{3,4\max} \geq \arcsin\left(\frac{D_3}{d_{2,7}}\right), \text{ durante a fase 3}$$

Os tempos T_1 , T_2 e T_3 são calculados usando a restrição das velocidades máxima e mínima que as juntas podem fornecer. Assim temos:

$$T_1 = \max \left\{ \frac{2D}{\dot{d}_{2,7\max} + \dot{d}_{2,7\min}}, \frac{2Db}{\dot{d}_{5\max} + \dot{d}_{5\min}}, \frac{W}{\dot{d}_{8\max} + \dot{d}_{8\min}} \right\}$$

$$T_2 - T_1 = \max \left\{ \frac{2Db}{\dot{d}_{5\max} + \dot{d}_{5\min}}, \frac{\arcsin\left(\frac{S-D}{d_{2,7}}\right)}{q_{4\max} + q_{4\min}} \right\}$$

$$T_3 - T_2 = \max \left\{ \frac{2Db_3}{\dot{d}_{5\max} + \dot{d}_{5\min}}, \frac{\arcsin\left(\frac{D_3}{d_{2,7}}\right)}{q_{4\max} + q_{4\min}} \right\}$$

$$T_4 = T_3 + 0.1$$

T_4 é mais difícil de calcular e por isso optou-se por se somar uma constante ao tempo T_3 . Durante a simulação verificou-se que era suficiente. Em [2] o valor da constante foi ajustada experimentalmente por tentativa e erro.

As condições de equilíbrio restringem-se a que durante as fases 1, 2 e 3 o cg “caia” sobre o pé de apoio. Assim quer-se:

$$\mathbf{Xc}_{g_{xx}} - x_1 < C/2 \text{ e } \mathbf{Xc}_{g_{yy}} - W/2 < l/2,$$

em que C é o comprimento e l a largura do pé. Ao contrário do que pensávamos inicialmente, o peso de balanço tem muito pouca influência no andar face às restrições para o tamanho do pé. Assim verificámos que para o bípode se pode manter de pé, são necessários uns pés muito maiores do que pensávamos inicialmente. O peso de balanço, afinal apenas corrige pequenas imperfeições e dá uma pequena ajuda a manter o bípode equilibrado.

Simulação

O modelo do bípede foi implementado em Matlab/Simulink. Os parâmetros usados na simulação do bípede foram: $m_1 = 5 \text{ kg}$, $m_0 = 31 \text{ Kg}$, $m_b = 15 \text{ kg}$, $C = 15 \text{ cm}$, $l = 0 \text{ cm}$, $W = 30 \text{ cm}$, $S = 20 \text{ cm}$, $H = 54 \text{ cm}$, $D = 3 \text{ cm}$, $D_b = 5 \text{ cm}$, $D_3 = S - D = 17 \text{ cm}$, $D_{b3} = -(m_2/m_b)*D_3 = 5.33 \text{ cm}$, $H = d_{2_0}$.

Para controlar o bípede foi usada uma lei de controlo particionada, transformando o modelo num duplo integrador. O modelo que foi simulado foi o modelo no espaço cartesiano.

Para controlar o duplo integrador, foram usadas duas técnicas diferentes:

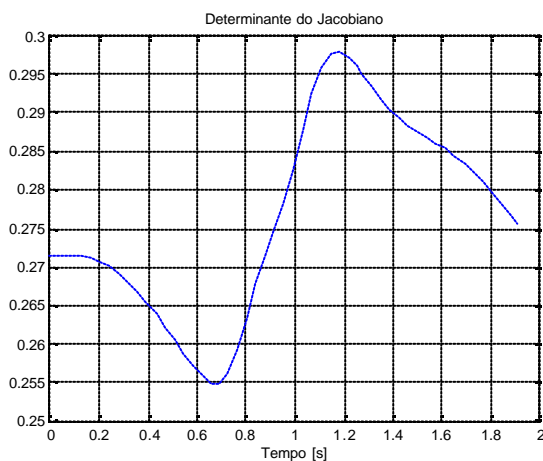
- 1) um controlo PD mais compensação da gravidade
- 2) uma lei de controlo apresentada em [3], que foi usado neste *paper* para controlar um duplo integrador.

No caso do controlo através de um compensador PD, a lei de controlo foi a seguinte:

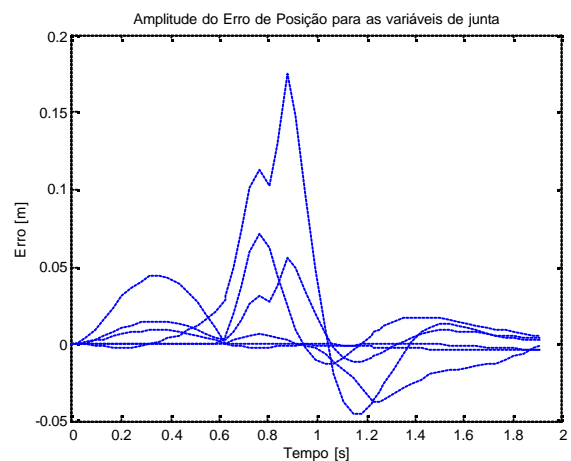
$$\mathbf{t} = \mathbf{K}_p \mathbf{e} - \mathbf{K}_v \dot{\mathbf{p}}$$

Os ganhos \mathbf{K}_p e \mathbf{K}_v são matrizes diagonais. Os valores foram calculados para obter uma resposta ligeiramente sub-amortecida de um duplo integrador. Os pólos foram colocados de modo a tornar o sistema tão rápido quanto desejável. Como não se teve em conta as velocidades máximas para cada variável do espaço cartesiano, os pólos foram posicionados através de tentativa e erro de modo a que o bípede pudesse corresponder dentro do tempo especificado para um ciclo do andar.

Determinante do Jacobiano



Erro de posição



Como podemos ver, o Jacobiano é sempre não singular durante o ciclo do andar, tal como previsto. O erro de posição da variável x_2 é o maior de todos. Isto significa que a perna de balanço não está a rodar suficientemente depressa. Assim o robot pode cair ou mesmo no fim da fase 4 existir um impacto com o chão não desprezável. Desta forma as

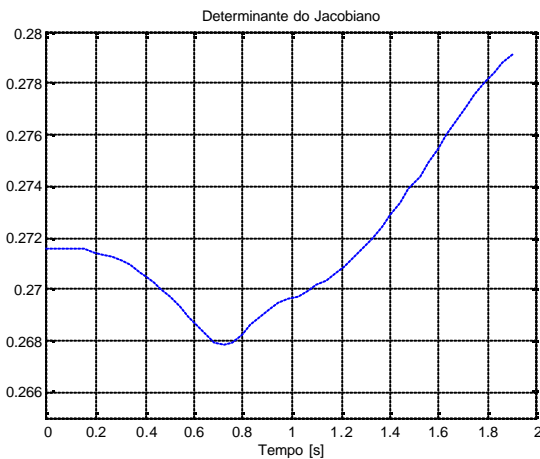
juntas dos joelhos devem ser suficientemente rápidas de modo a que se consiga levantar a perna de suporte no tempo exigido.

Em [3] é utilizada a seguinte lei de controlo para um duplo integrador:

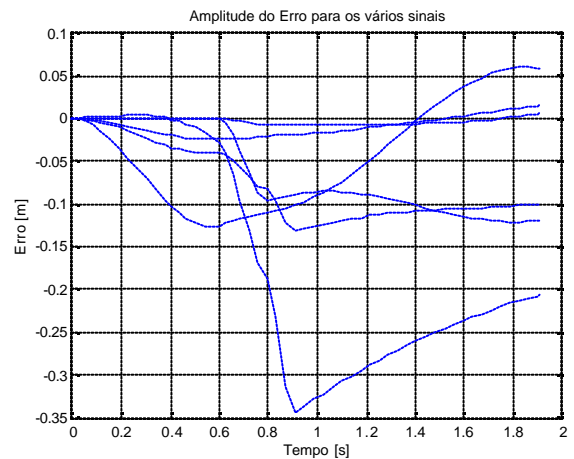
$$v = -\text{sign}\left(\dot{p}\right)\left|\dot{p}\right|^a - \text{sign}(F)\left|F\right|^{\frac{a}{2-a}}, \text{ com } F = p + \frac{1}{2-a}\text{sign}\left(\dot{p}\right)\left|\dot{p}\right|^{2-a} \text{ e } 0 < a < 1$$

O sistema em cadeia fechada revelou-se muito lento. Modificando-se α conseguiu-se aumentar ligeiramente a velocidade do sistema mas nunca de forma satisfatória. Concluimos então que a lei de controlo usada em [3] serviu apenas para se poder derivar conclusões em [3] uma vez que a lei de controlo confere um certo número de propriedades ao sistema em cadeia fechada que são usadas em [3]. Tal como para a lei de controlo anterior mostramos os gráficos obtidos com esta lei de controlo, do determinante do Jacobiano durante um ciclo do andar e do erro de posição. Novamente a variável que têm o maior erro de posição é x_2 .

Determinante do Jacobiano



Erro de posição



Apêndice A

O jacobiano do bípede é o seguinte:

$$J = \begin{bmatrix} z_0 - z_1 & s1 & z_0 - z_2 & 0 & s4 & 0 \\ x_1 - x_0 & c1 & x_0 - x_2 & 0 & -c4 & 0 \\ z_0 - z_1 & s1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ x_1 - x_0 & c1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ z_0 - z_1 & s1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \text{em que } \begin{cases} s1 = \frac{x_1 - x_0}{\sqrt{(x_1 - x_0)^2 + (z_1 - z_0)^2}} \\ c1 = \frac{z_0 - z_1}{\sqrt{(x_1 - x_0)^2 + (z_1 - z_0)^2}} \\ s4 = \frac{x_0 - x_2}{\sqrt{(x_0 - x_2)^2 + (z_0 - z_2)^2}} \\ c4 = \frac{z_0 - z_2}{\sqrt{(x_0 - x_2)^2 + (z_0 - z_2)^2}} \end{cases}$$

Bibliografia:

- [1] Jung-Min Yang, Jong-Hwan Kim, “A fault tolerant gait for Hexapod robot over uneven Terrain”, IEEE Transactions on Systems, Man, And Cybernetics - Part B: Cybernetics, Vol. 30, No 1, February 2000
- [2] Ching-Long Shih, “Ascending and Descending Stairs for a Biped Robot”, IEEE Transactions on Systems, Man, And Cybernetics - Part A Systems and Humans, Vol. 29, No 3, May 1999
- [3] Jesse W. Grizzle, Gabriel Abba, and Franck Plestan, “Asymptotically Stable Walking for Biped Robots: Analysis via Systems with Impulse Effects”, IEEE Transactions on Automatic Control, Vol. 46, No. 1, January 2001
- [4] Eturoo Igarashi, and Tooru Nogai, “Dynamic analysis and control of bipede locomotion in the double supporting phase”, Advanced Robotics, Vol. 6, No. 3, 1992
- [5] Mariano Garcia, Anindya Chatterjee, Andy ruína, Michael Coleman, “The simplest walkink model: stability, complexity, and scaling”, ASME journal of Biomedical Engineering, February 10, 1998
- [6] Enric Celaya, Josep M. Porta, “A control structure for the locomotion of a legged robot on difficult terrain”, IEEE Robotics & Automation Magazine, June 1998