

Dinâmica de Manipuladores Flexíveis

PARTE I

Neste artigo aborda-se a dinâmica directa de manipuladores robóticos com membros flexíveis. A estrutura mecânica do manipulador é composta de membros constituídos de segmentos interligados por juntas rotacionais. Os segmentos são considerados activos ou passivos. A junta rotacional que interliga o segmento activo de um membro, em relação ao membro anterior, representa um grau de liberdade activo, isto é, corresponde ao eixo onde está inserido o actuador. Os segmentos subsequentes podem apresentar deformação (torção e/ou flexão em um ou dois planos) que é compensada nas articulações fictícias dos mesmos. As juntas rotacionais que interligam esses segmentos representam os graus de liberdade passivos, ou seja, correspondem aos eixos onde são considerados os ângulos de deformação. A partir desta concepção da estrutura elabora-se a dinâmica inversa utilizando-se uma formulação numérica recursiva de Newton-Euler. Com a avaliação da dinâmica directa faz-se a simulação temporal do sistema utilizando diversos métodos de integração numérica. São apresentadas comparações relativas a eficiência e precisão do sistema, assim como alguns resultados obtidos com os métodos de integração utilizados.

1. INTRODUÇÃO

Um manipulador robótico pode ser considerado como um dispositivo electromecânico que tem por função posicionar e orientar um mecanismo existente na sua extremidade. Este mecanismo tem como objectivo fazer a fixação adequada de ferramentas definidas pelo tipo de tarefa a executar. As características cinemáticas do manipulador definem o seu volume de trabalho. Podem ser consideradas duas partes principais na estrutura do manipulador: A primeira parte é constituída, no mínimo, por três graus de liberdade (gdl) utilizados para posicionamento do ponto de concentração dos referenciais de orientação. A segunda parte é, normalmente, constituída por outros três gdl's rotacionais para orientação do referencial terminal. A Figura 1 mostra uma representação esquemática de um manipulador convencional, com juntas rotacionais. Os três primeiros graus de liberdade constituem o braço e os outros três o punho.

Não tomando em consideração a deformação nas juntas, pode-se considerar que os membros com gdl's responsáveis pela orientação podem ser considerados rígidos, pois, os respectivos referenciais são sobrepostos em um ponto comum. O membro com o primeiro gdl, também pode ser considerado rígido, devido à sua ligação directa com o referencial inercial. Desta forma, o problema da deformação devido a flexão e/ou torção dos membros que constituem o manipulador aparece, efectivamente, nos segundo e terceiro membros de posicionamento. Assim, nas secções apresentadas de seguida estudam-se os fenómenos que ocorrem nesses membros.

Na elaboração do modelo matemático da estrutura mecânica considera-se que a deformação dos membros fica restringida a variações angulares nas juntas passivas, pelo que, todos os

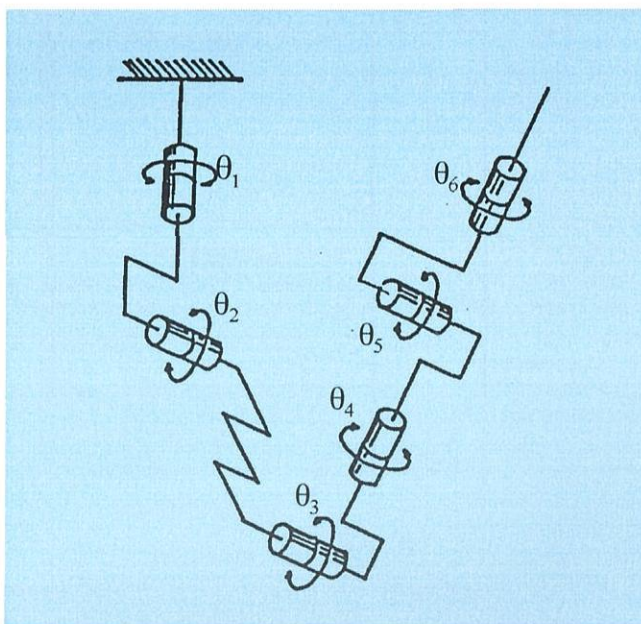
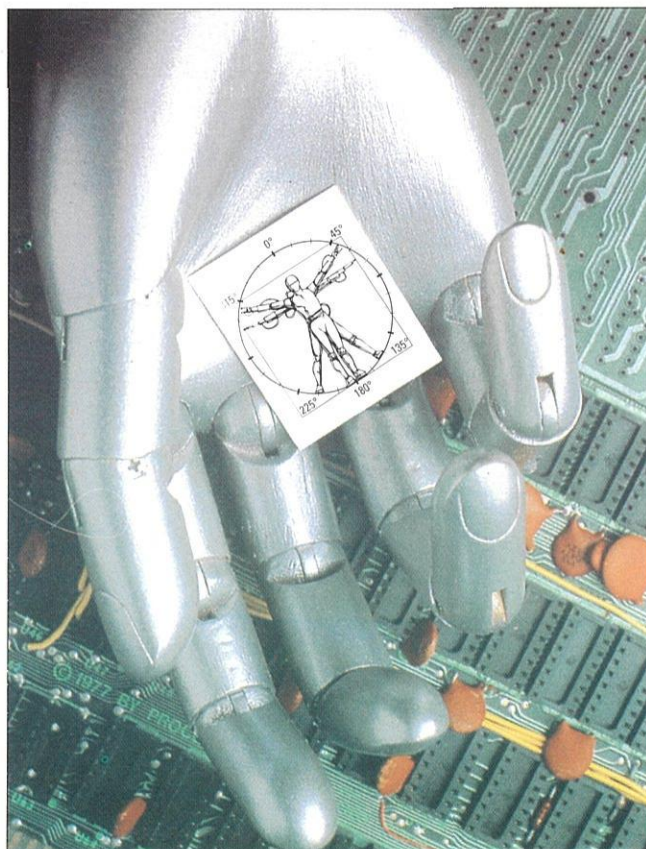


Figura 1 – Manipulador com juntas rotacionais.

segmentos podem ser considerados rígidos. Desta forma, é possível elaborar um modelo semelhante ao método recursivo de Newton-Euler (N-E) utilizado para sistemas rígidos na resolução da dinâmica inversa [1]. A partir desse método, estabelece-se o sistema dinâmico da estrutura com um número qualquer de membros e segmentos. Assim, o modelo desenvolvido pode ser aplicado para vários níveis de precisão através da selecção do número adequado de segmentos por membro. É evidente que quanto maior essa relação maior será a complexidade do sistema, pelo que, para cada caso, o número de segmentos deverá ser "ajustado" para uma precisão adequada das variáveis a serem simuladas.

2. ESTRUTURA MECÂNICA

A estrutura do manipulador com membros flexíveis consiste numa cadeia aberta composta de n membros com juntas rotacionais, que correspondem aos gdl's activos onde estão presentes os actuadores, e $nseg$ juntas rotacionais, que correspondem a $(nseg - 1)$ segmentos por cada membro. Em cada segmento consideram-se de um a três gdl's passivos, como referido a seguir.

Os membros constituintes da estrutura têm a forma indicada na Figura 2, onde se mostram os eixos dos referenciais locais da junta activa ($X_{i,0}, Y_{i,0}, Z_{i,0}$) e das juntas passivas ($X_{i,j}, Y_{i,j}, Z_{i,j}$), para $j = 1, \dots, nseg - 1$. A origem do referencial constituído pelos eixos ($X_{i,nseg}, Y_{i,nseg}, Z_{i,nseg}$) é coincidente com a origem do referencial da junta activa do membro $i + 1$. O eixo X do referencial inercial tem direcção e sentido coincidentes com o eixo da acção da gravidade. A junta do primeiro membro, é uma junta activa e está posicionada na base do manipulador. Considera-se que o eixo Z do referencial desse membro é coincidente com o eixo Z do referencial inercial (i.e. $X_0 = Z_1$) e que esse membro não sofre qualquer tipo de deformação. O segundo membro é considerado flexível e é constituído por uma junta activa no eixo $Z_{2,0}$ do referencial do membro. A partir desse referencial, estabelecem-se os referenciais das juntas passivas designadas por $Z_{2,j}$, onde $j = 1, \dots, nseg - 1$. Para os membros seguintes adopta-se a mesma convenção. Pode-se notar que os gdl's activos têm seus eixos posicionados nos eixos Z dos referenciais locais e os membros deslocam-se no plano XY desses mesmos referenciais. Nos referenciais passivos dos membros flexíveis, a rotação em X significa uma torção do segmento e as rotações em Y e Z significam, respectivamente, flexão nos planos XZ e XY do referencial do segmento considerado.

Para analisar as deformações faz-se a aproximação de cada membro flexível por uma série de pequenos segmentos rígidos interligados por juntas fictícias [1-2], nas quais são concentradas as deformações devido à flexão e/ou torção de cada segmento. Não se considera o efeito de deformação longitudinal dos segmentos da estrutura. Os segmentos activos dos membros possuem apenas um gdl no eixo Z do seu respectivo referencial. Nos segmentos passivos dos membros assume-se que os gdl's correspondentes dependem do tipo de análise:

- Considera-se o tipo T1 para o caso em que os segmentos passivos de cada membro, da estrutura articulada, são considerados rígidos em X (torção), rígidos em Y (flexão) e deformáveis em Z (flexão). Tem-se um gdl activo, que corresponde a junta desse membro e $nseg - 1$ gdl's passivos que correspondem a flexão considerada em relação ao eixo Z do referencial de cada segmento. Dessa forma, para n membros flexíveis com $nseg - 1$ segmentos/membro, tem-se ngl , o número total de gdl's, definido por:

$$ngl = n \times nseg \quad (2.1)$$

- Para o tipo T2 considera-se que cada segmento flexível de cada membro é deformável em relação ao eixo Y e Z . Tem-se um gdl activo por membro, que corresponde a sua junta activa e $2nseg - 1$ gdl's passivos/membro, que correspondem a deformação considerada em Y e Z . Assim, numa estrutura com n membros flexíveis e $nseg - 1$ segmentos por cada membro, tem-se ngl , o total de gdl's, definido por:

$$ngl = n \times (2nseg - 1) \quad (2.2)$$

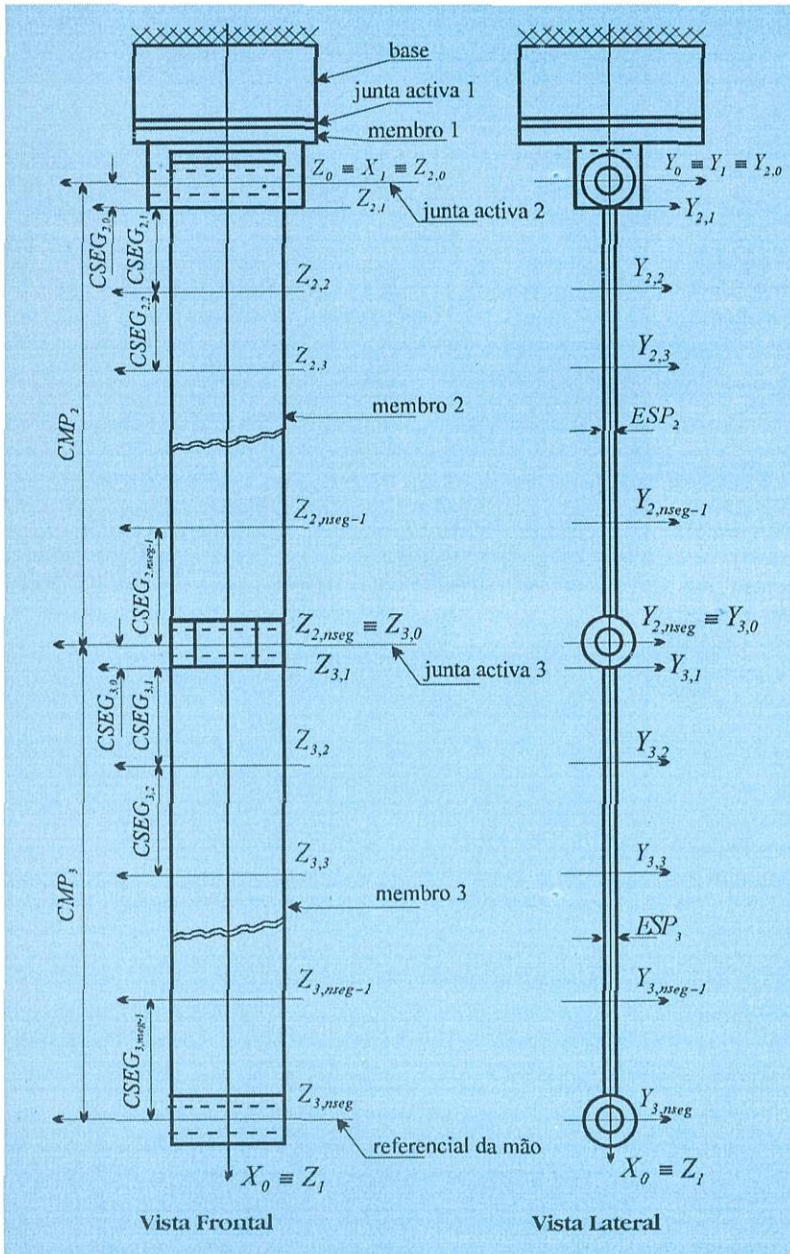


Fig. 2 - Estrutura mecânica de um manipulador com 2 membros flexíveis e 3 juntas activas

- No tipo T3 considera-se a deformação nos três eixos de cada segmento flexível de cada membro. Seguindo-se o mesmo raciocínio que anteriormente tem-se ngl igual a:

$$ngl = n \times (3nseg - 2) \quad (2.3)$$

Na Figura 3 mostram-se as variáveis independentes consideradas nos tipos de análise da estrutura. A variável $\theta_{i,0}$ é o ângulo activo do membro i medido sobre o eixo $Z_{i,0}$ entre os eixos $X_{i-1,nseg-1}$ e $X_{i,0}$. $\theta_{i,j,k}$ corresponde ao ângulo passivo do segmento j , do membro i medido entre os eixos k dos segmentos $j-1$ e j (considera-se que $i=1, \dots, n, j=0, \dots, nseg-1$). No caso de $k=1, 2, 3$, faz-se a avaliação do sistema com análise do tipo T3, ou seja, tem-se rotação nos três eixos. Para $k=2, 3$ faz-se a análise do tipo T2, assim, considera-se rotação nos eixos dos Y e Z . Finalmente, para $k=3$ faz-se a análise do tipo T1, com rotação no eixo dos Z . Note-se que o número de segmentos deve ser, sempre, maior ou igual a dois, pois, estabeleceu-se que cada membro é definido por um segmento rígido, seguido dos respectivos segmentos flexíveis.

Esta avaliação do número total de graus de liberdade deve-se ao facto de se trabalhar na elaboração da dinâmica da estrutura com dois campos vectoriais. Internamente, nas subrotinas de avaliação do vector dos momentos das forças (giroscópica, centrípeta e de gravidade, de deformação e de fricção) e nos vectores para o cálculo da matriz inercial do sistema, tem-se a definição dos vectores das variáveis independentes com três dimensões. Essas dimensões referem-se ao membro, ao segmento do membro e ao eixo considerados. Externamente a essas subrotinas é mais conveniente trabalhar-se com os elementos desses vectores unidimensionalmente; ou seja, orientá-los sequencialmente, para a elaboração e resolução do sistema dinâmico. Desta forma, desenvolveu-se um conjunto de subrotinas com a finalidade de identificar as passagens de um campo vectorial para outro e vice-versa. Na Tabela 1 apresenta-se um resumo das relações dos tipos de análise dos eixos passivos da estrutura com os graus de liberdade totais.

Esta metodologia foi concebida para se estudar a importância de se considerar a rotação em todos os eixos dos referenciais passivos como do tipo T3. Entretanto, se os vectores envolvidos nesse caso não forem significativos, há a possibilidade de uma simplificação do modelo, para os tipos T2 ou T1. Desta forma, pode-se avaliar com maior segurança as simplificações possíveis, tendo em vista as características do manipulador robótico e das tarefas a serem realizadas no ambiente de trabalho.

3. CINEMÁTICA

Para estudar a estrutura de um manipulador é necessário definir a sua cinemática. Desta forma, nas subsecções seguintes são mostradas as convenções adoptadas para definir os vectores e matrizes locais para a estruturação da Cinemática Directa. A metodologia exposta a seguir, tem características idênticas à apresentada em [3-4], onde essas

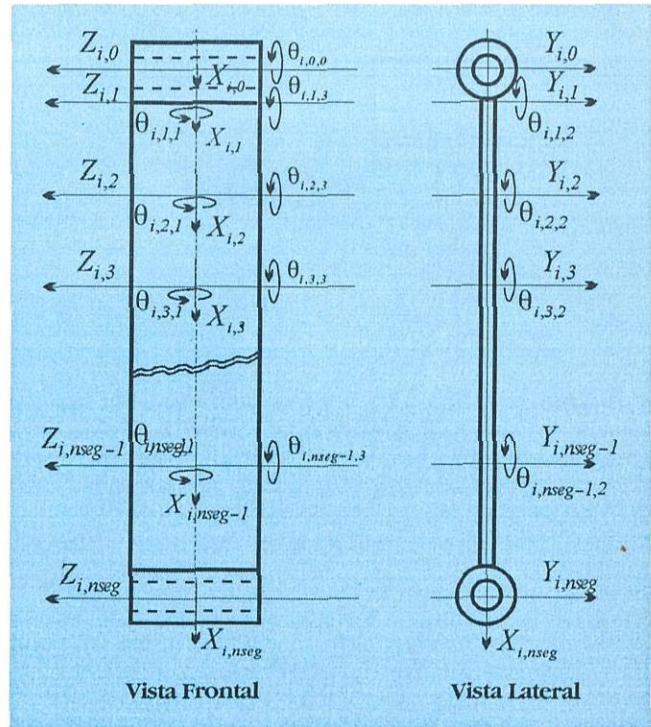


Figura 3 - Convenções das variáveis independentes.

grandezas cinemáticas são obtidas através de um modelo matemático recursivo da base para o topo.

Considerando-se as convenções estabelecidas por Denavit *et al* [5] para definir os vectores e matrizes de rotação locais do sistema e de acordo com os referenciais locais apresentados na Figura 4, a cinemática da estrutura pode ser estabelecida na forma apresentada seguidamente [6-8].

Nos referenciais das juntas activas, definidos por $(X_{i,0}, Y_{i,0}, Z_{i,0})$, em que o eixo activo é o respectivo eixo Z , as matrizes de rotação **rot**, dessas juntas ficam definidas por:

$$\mathbf{rot}_i = \begin{bmatrix} \cos q_{i,0,0} & -\cos \alpha_i \sin q_{i,0,0} & \sin \alpha_i \sin q_{i,0,0} \\ \sin q_{i,0,0} & \cos \alpha_i \cos q_{i,0,0} & -\sin \alpha_i \cos q_{i,0,0} \\ 0 & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

onde α_i corresponde ao ângulo de montagem da estrutura sem deformação, medido sobre o eixo $X_{i,0}$, entre os eixos $Z_{i,0}$ e $Z_{i+1,0}$. A partir do referencial activo do membro i , estabelecem-se os referenciais dos segmentos j que, na condição sem deformação, tem a orientação dos seus eixos coincidentes a desse referencial. As rotações nos referenciais dos segmentos passivos podem ocorrer nos três eixos. Estas rotações são devidas à deformações por flexão e/ou torção. Considerando-se que estas deformações são pequenas pode-se assumir que $\cos q_{i,j,k} \approx 1$ e $\sin q_{i,j,k} \approx q_{i,j,k}$. Desta forma, a matriz

Tipo	Rotação em X (torção)	Rotação em Y (flexão)	Rotação em Z (flexão)	Graus de Liberdade (ngl)
T1	não considerada	não considerada	considerada	$n \times nseg$
T2	não considerada	considerada	considerada	$n \times (2nseg - 1)$
T3	considerada	considerada	considerada	$n \times (3nseg - 2)$

Tabela 1 - Tipos de Análise dos Eixos Passivos versus Graus de Liberdade Totais

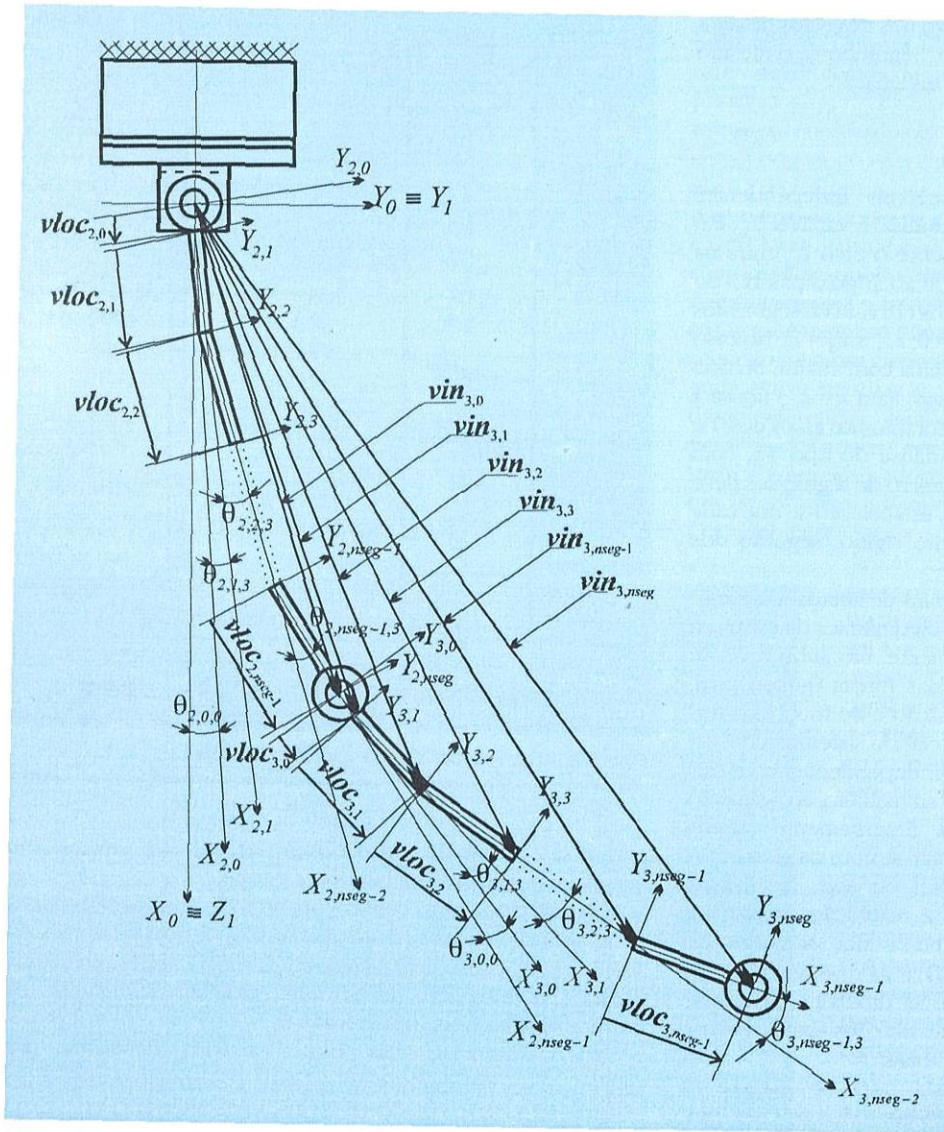


Figura 4 - Vectores locais e inerciais na cinemática directa

resultante da rotação dos eixos dos referenciais passivos $\mathbf{rlin}_{i,j}$ pode ser escrita na forma:

$$\mathbf{rlin}_{i,j} = \begin{bmatrix} 1 & -q_{i,j,3} & q_{i,j,2} \\ q_{i,j,3} & 1 & -q_{i,j,1} \\ -q_{i,j,1} & -q_{i,j,1} & 1 \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

Deve ter-se em atenção que, na consideração de linearidade da matriz de rotação $\mathbf{rlin}_{i,j}$, as variáveis independentes envolvidas não devem exceder $\pm 15^\circ$, caso contrário, as simplificações não têm validade. Analogamente, considera-se que as deformações nas juntas passivas estão em estado elástico de deformação, o que viabiliza as simplificações na obtenção de $\mathbf{rlin}_{i,j}$. Para o estabelecimento dos vectores locais de cada referencial, considera-se que, a partir do referencial inercial, tem-se o vector posição do referencial do primeiro membro, que é rígido. A partir desse referencial tem-se o vector posição do referencial rígido do segundo membro. A seguir, tem-se o referencial do primeiro segmento desse membro, e assim sucessivamente até ao vector posição do referencial da mão, que é definido a partir do referencial terminal do membro n no segmento $nseg - 1$. Esse conjunto de vectores, das posições relativas dos referenciais, pode ser escrito na forma geral:

$$\mathbf{vloc}_{i,j} = \{a_{i,j} \ d_i \sin \alpha_i \ d_i \cos \alpha_i\}^T \quad (3.3)$$

onde $a_{i,j}$ é a distância medida sobre o eixo $X_{i,j}$, entre os eixos $Z_{i,j}$ e $Z_{i,j} + 1$, e d_i é a distância medida sobre o eixo $Z_{i,j}$ entre os eixos $X_{i,j} - 1$ e $X_{i,j}$.

Os vectores dos centros de massa (CM) dos segmentos, relativos aos referenciais locais de cada segmento, podem ser escritos como:

- Para os segmentos rígidos tem-se:

$$\mathbf{vcg}_{i,j} = \{0 \ 0 \ 0\}^T \quad (3.4)$$

- Para os segmentos flexíveis $1 \leq j < nseg - 1$ do membro i tem-se:

$$\mathbf{vcg}_{i,j} = \left\{ \frac{CSEG_{i,j}}{2} \ 0 \ 0 \right\}^T \quad (3.5)$$

- Para o segmento flexível $j = nseg - 1$ do membro i tem-se:

$$\mathbf{vcg}_{i,j} = \left\{ \frac{(CSEG_{i,j} + R_c)}{2} \ 0 \ 0 \right\}^T \quad (3.6)$$

A variável $CSEG_{i,j}$ representa o comprimento do segmento ($i = 1, \dots, n$ e $j = 1, \dots, nseg - 1$). Se $j = nseg - 1$ então $i = i + 1$ e $j = 0$.

Considerado os segmentos com comprimentos idênticos, pode-se escrever que:

$$CSEG_{i,j} = \frac{CMP_i - R_c}{nseg - 1} \quad (3.7)$$

Estabelecidos os vectores e matrizes dos referenciais locais, pode-se estabelecer a cinemática directa. Esta objectiva a transformação das coordenadas articulares para coordenadas cartesianas com relação ao referencial inercial.

Desta forma, pode-se avaliar o comportamento do referencial terminal em coordenadas cartesianas. Assim, é necessário estabelecer as matrizes de orientação de cada referencial com relação ao sistema inercial. Dessa forma, tem-se que:

- 1 - Para o estabelecimento das matrizes inerciais de rotação dos referenciais locais, começa-se pela base do manipulador, onde esta posicionado e orientado o referencial inercial. Para $i = 0$, tem-se:

$$\mathbf{R}_{i,j} = \mathbf{I}_{3 \times 3} \quad (3.8)$$

em que $\mathbf{R}_{i,j}$ é a matriz de orientação do membro i no segmento j , com relação ao referencial inercial, e $\mathbf{I}_{3 \times 3}$ corresponde à matriz identidade com dimensão 3×3 .

- Para os segmentos activos; ou seja para $i > 0$ e $j = 0$, vem:

$$\mathbf{R}_{i,j} = \mathbf{R}_{i-1, nseg-1} \mathbf{rot}_i \quad (3.9)$$

- Para os segmentos passivos, ou seja para $i > 0$ e $j > 0$, vem:

$$\mathbf{R}_{i,j} = \mathbf{R}_{i,j-1} \mathbf{rlin}_{i,j} \quad (3.10)$$

2 – Obtidas as matrizes de orientação inercial dos referenciais locais podem estabelecer-se os vectores inerciais de posicionamento dos referenciais locais $\mathbf{vin}_{i,j}$.

- Para o referencial inercial em que $i = 0$ vem:

$$\mathbf{vin}_{i,j} = \{0 \ 0 \ 0\}^T \quad (3.11)$$

- Para os segmentos activos, ou seja para $i > 0$ e $j = 0$, vem:

$$\mathbf{vin}_{i,j} = \mathbf{vin}_{i-1, nseg-1} + \mathbf{R}_{i,j} \mathbf{vloc}_{i,j} \quad (3.12)$$

Para os segmentos passivos, ou seja para $i > 0$ e $j > 0$, vem:

$$\mathbf{vin}_{i,j} = \mathbf{vin}_{i,j-1} + \mathbf{R}_{i,j} \mathbf{vloc}_{i,j} \quad (3.13)$$

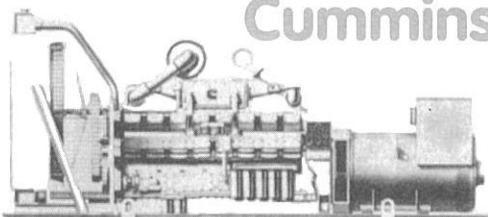
Com todos os vectores inerciais $\mathbf{vin}_{i,j}$ fica estabelecida a cinemática directa da estrutura. Dessa forma, esses vectores fornecem as coordenadas cartesianas das origens dos referenciais locais com relação ao sistema inercial estabelecido.

Na parte seguinte deste artigo aborda-se o sistema dinâmico da estrutura para os três tipos de análise considerados.

* *Universidade da Beira Interior;*
Dep. Eng. Electromecânica

** *Faculdade de Engenharia da*
Universidade do Porto; Dep. Eng.
Electrotécnica e Computadores

GRUPOS ELECTROGENEOS Cummins



MAIS DE 110.000 KVA INSTALADOS EM PORTUGAL

UPS EXIDE



MAIS DE 260.000 KVA INSTALADOS EM PORTUGAL



ELECTRO CENTRAL VULCANIZADORA, LDA.

Av. Serpa Pinto, 534 - 1º - 4450 Matosinhos - Tel. 937 08 08 - Fax 937 13 65

R. Conc. Mart Carvalho, L 1480 - 1400 (Restelo) Lisboa - Tel. 301 53 61 - Fax 301 76 59

SALESKIT

CERTAMENTE QUE O KIT QUE VOCÊ
NECESSITA, A SALESKIT TEM!

Com quase três décadas de existência,
a SALESKIT orgulha-se da grande
variedade e qualidade dos seus kits.

O CENTRO ELECTRÓNICO DE COIMBRA
tem o prazer de informar que foi
nomeado representante desta famosa
marca de kits, já tendo iniciado a sua
Distribuição Oficial para Portugal.

Se desejar ser nosso Cliente ou Agente,
terá à sua disposição uma vastíssima
gama de aplicações.

ACEITAMOS REVENDEDORES EM TODO O PAÍS



CENTRO ELECTRÓNICO DE COIMBRA
COMPONENTES ELECTRONICOS E TELECOMUNICACOES

Rua Bernardo de Albuquerque, 137-B - Apartado 2017 - 3000 COIMBRA
Tel.: 039 - 48 40 94 (c/scanner) - Fax: 039 - 48 24 77 (serviço a clientes)