

# Estimação da posição de um VANT por imagens com o uso da notação de Denavit-Hartenberg

Rogério Adas Pereira Vitalli, Elcio Hideiti Shiguemori e Maurício Pozzobon Martins

Instituto de Estudos Avançados – IEAv, Rod. dos Tamoios, Km 5,5 – Putim – CEP: 12.228-001, São José dos Campos, Brasil

**Resumo** — Neste trabalho apresenta-se um estudo do emprego da notação de Denavit-Hartenberg (D-H) para estimar as coordenadas de um VANT com informações de imagens obtidas por uma câmera apontada para um alvo conhecido. Considerando que o sistema de coordenadas utilizado para descrever o movimento do VANT em relação ao alvo não deve ser feito de forma totalmente arbitrária, levando-se em conta modelos de representação no espaço tridimensional e implicações de natureza computacional, o estudo foca no emprego da notação de D-H na busca pela solução do problema cinemático.

**Palavras-chaves** — Notação de Denavit-Hartenberg, VANT e Navegação Autônoma.

## I. INTRODUÇÃO

Durante os últimos anos pôde-se observar um contínuo aumento do emprego de VANT (Veículo Aéreo Não Tripulado), com grande potencial de aplicações civis e militares em operações nas quais a presença de um tripulante seria inadequada. Um dos desafios do desenvolvimento tecnológico de VANTs é dotá-los de capacidade de navegação autônoma independente de sistemas de navegação por satélite. Uma alternativa é o desenvolvimento de um sistema embarcado que realize a localização automática da aeronave com base em imagens do local sobrevoado. Este é o tema de pesquisa do Projeto PITER (Processamento de Imagens em Tempo Real) em desenvolvimento no Instituto de Estudos Avançados (IEAv), no qual destacam-se alguns estudos como: reconhecimento de padrões, visão computacional, cálculo automático de trajetórias e implementação em sistemas embarcados de tempo real. A notação de Denavit-Hartenberg (D-H) é introduzida como um método sistemático para descrever-se um elo robótico separando um par sucessivo de juntas rotativas ou prismáticas que posteriormente será estendida para a problemática em estudo [1]. Em [2] apresenta-se um procedimento mais simples e intuitivo para a sistemática da notação de D-H, tanto em sua forma padrão quanto modificada. Além de concatenar rotação e translação dos *frames* dos sistemas de coordenadas em uma só matriz de transformação homogênea 4x4, o método também diminui o tempo computacional [3].

Rogério Adas Pereira Vitalli, vitalli@ieav.cta.br; Elcio Hideiti Shiguemori, elcio@ieav.cta.br; Maurício Pozzobon Martins, mauricio@ieav.cta.br; Tel +55-12-3947-5336, Tel +55-12-3947-5356, Tel. +55-12-3947-5317.

## II. ALINHAMENTO DA CÂMERA

A captura de imagens aéreas é realizada com informações de uma câmera acoplada ao VANT. Para uma câmera já calibrada, é necessário fixar ou alinhar ela com o VANT. Portanto, considere a situação descrita pela Fig. 1 abaixo.

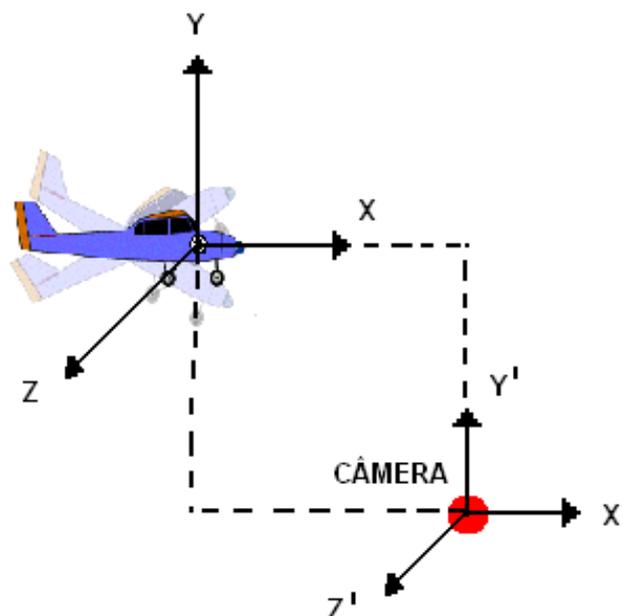


Fig. 1. VANT com câmera desalinhada.

Neste trabalho não é considerada a rotação entre a câmera e o VANT como mostra a Fig 1, sendo necessário apenas translação para o alinhamento e a coincidência dos sistemas de coordenadas. Embora exista diversas situações de posicionamento do VANT e da câmera, este é o caso mais simples porque uma matriz identidade 3x3 passa a compor a transformação ( $T_{Vant}$ ) para o computo da matriz ( $C_{final}$ ) de ordem 4x4. Portanto, a câmera alinhada (Fig 2) com o VANT é dada por “(1)”.

$$[C]_{final} = T_{Vant} \cdot [C]_{inicial} \quad (1)$$

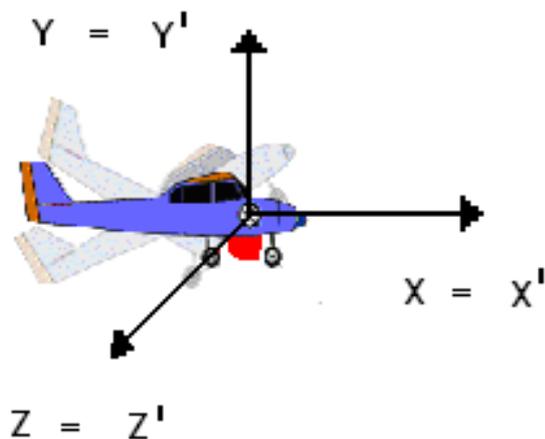


Fig. 2. VANT com câmera alinhada.

### III. NOTAÇÃO DE DENAVIT-HARTENBERG (D-H)

Em meados de 1945, o Professor Denavit junto ao seu orientado Hartenberg, desenvolveu uma notação na qual o objetivo era puramente buscar facilidade no projeto de mecanismos bélicos. Neste período as atenções eram voltadas para os interesses da Segunda Guerra Mundial. Duas décadas depois essa notação chamou a atenção do pesquisador R. P. PAUL que estudava problemas de orientação em corpos rígidos no M.I.T. conforme [4]. No estudo da Robótica, há o constante interesse na localização tridimensional de objetos, como elos robóticos, partes, ferramentas e outros, no ambiente de trabalho do manipulador [5], [6] e [7]. De modo a se descrever simultaneamente posição e orientação de um corpo no espaço (necessários 6 G.D.L.), vai-se fixar um sistema coordenado ao objeto, com isso permitindo descrever-se posição e orientação deste sistema (e por conseguinte do objeto) com relação a um sistema coordenado de referência. Por exemplo, pode-se descrever a posição de um manipulador dando-se uma descrição do sistema coordenado fixado no órgão terminal, relativa ao sistema coordenado fixado na base não móvel do manipulador. Assim a notação de original de D-H pode ser vista pela Fig. 3

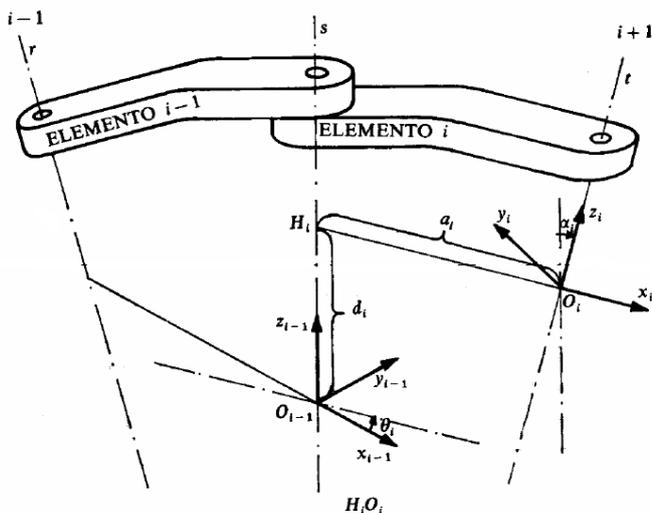


Fig. 3. Notação de Denavit-Hartenberg

A notação de Denavit-Hartenberg é introduzida como um método sistemático para descrever-se um elo separando um par sucessivo de juntas (rotativas ou prismáticas) e o relacionamento cinemático entre um par de elos adjacentes. A base do manipulador é considerada como elo 0 e os outros elos recebem numeração crescente de 1 a n, progressivamente da base para o órgão terminal. Para isso um número mínimo de parâmetros são utilizados:

$a_i$  - comprimento da normal comum ( $H_i O_i$ ), ou seja, a distância entre os eixos das juntas em cada terminal do elo  $i$ , medida ao longo da linha normal a ambos esses eixos ao longo de ( $\hat{x}_i$ );

$d_i$  - comprimento entre a origem ( $O_{i-1}$ ) e o ponto ( $H_i$ ), ou seja, a distância entre as normais comuns ( $H_{i-1} O_{i-1}$ ) e ( $H_i O_i$ ), medida ao longo de ( $\hat{z}_{i-1}$ );

$\theta_i$  - ângulo entre o eixo ( $\hat{x}_{i-1}$ ) e a normal comum ângulo eixo ( $\hat{x}_i$ ), medido em torno do eixo ( $\hat{z}_{i-1}$ ) no sentido da mão direita;

$\alpha_i$  - ângulo entre o eixo da junta  $i$  ( $\hat{z}_{i-1}$ ) e o eixo da junta  $i+1$  ( $z_i$ ), no sentido da mão direita, medido em torno de ( $\hat{x}_i$ ).

Os parâmetros  $a_i$  (comprimento do elo) e  $\alpha_i$  (ângulo de torção) são constantes e determinados pela geometria do elo. Somente um dos dois outros parâmetros  $d_i$  (comprimento entre as normais comuns) e  $\theta_i$  (ângulo de rotação) varia quando a junta  $i$  se move. Denotamos por  $d_i$  quando a junta for prismática e por  $\theta_i$  quando a junta for rotativa, e pode ser chamada, genericamente de *variável da junta*. A obtenção das transformações entre os elos objetiva-se determinar a forma geral da transformação que relaciona os sistemas coordenados de elos vizinhos. Uma vez obtido isso no espaço tridimensional, tais transformações podem ser concatenadas de modo a se resolver a problemática de orientação e translação de uma só vez. Assim, considerando novamente a notação de D-H (Fig 3), existem dois sistemas coordenados intermediários entre  $\{i-1\}$  e  $\{i\}$ ; um deles centrado em ( $O_i$ ) e coincidente com  $\{i\}$  exceto que  $\{i\}$  está girando relativamente a ele por uma rotação ( $\alpha_i$ ) em torno de ( $\hat{x}_i$ ), ou seja, o seu eixo ( $z$ ) é paralelo e de mesmo sentido que ( $\hat{z}_{i-1}$ ); o outro, centrado em ( $H_i$ ) e de mesma orientação que o primeiro. Nota-se, então, que a transformação ( ${}^i T_{i-1}$ ) pode ser obtida através de transformações simples passando por esses sistemas intermediários, isto é:

$${}^i T_{i-1} = ROT(\hat{z}_{i-1}, \theta_i).TRANS(\hat{z}_{i-1}, d_i).TRANS(\hat{x}_i, a_i).ROT(\hat{x}_i, \alpha_i) \tag{2}$$

Na referência “[8]” são deduzidas as matrizes de transformação desses sistemas intermediários utilizando conceitos de geometria projetiva e co-senos diretores. Multiplicando-as na mesma seqüência conforme indicado em “(2)”, obtém-se,

$${}^{i-1}T_i = \begin{bmatrix} c\theta_i & -s\theta_i.c\alpha_i & s\theta_i.s\alpha_i & a_i.c\theta_i \\ s\theta_i & c\theta_i.c\alpha_i & -c\theta_i.s\alpha_i & a_i.s\theta_i \\ 0 & s\alpha_i & c\alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

A Eq. (3) e sua inversa são os maiores resultados da notação de D-H. Com elas se estabelecem as etapas básicas para o processo de modelagem de um manipulador robótico. Neste trabalho esta abordagem será estendida para a modelagem de um VANT.

#### IV. DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

O problema consiste basicamente de estimar a posição e orientação do VANT; partindo de uma base fixa e considerando um alvo no solo previamente estudado. A Fig 4 define a situação-problema considerando o alvo como sendo um edifício com coordenadas conhecidas.

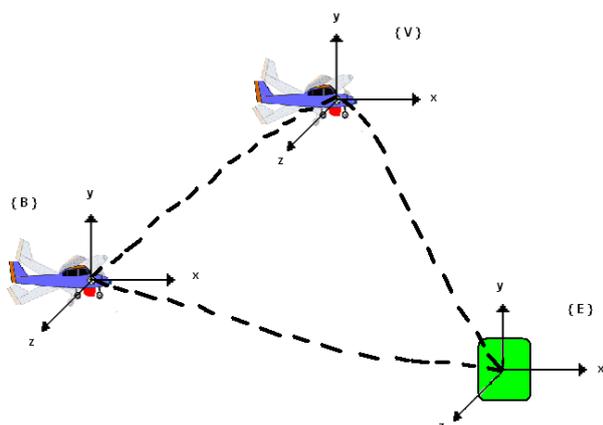


Fig. 4. Problemática com sistemas de coordenadas arbitrárias

A distância do ponto inicial de partida do VANT (base) é conhecida. Também é conhecida através da captura de duas imagens em vôo que o VANT inicia um rastreamento. Portanto, aplica-se a notação de D-H para convencionar de maneira não arbitrária o sistema de coordenadas da Base {B}, Vant {V} e Edifício {E}. A nova situação pode ser definida pela Fig 5.

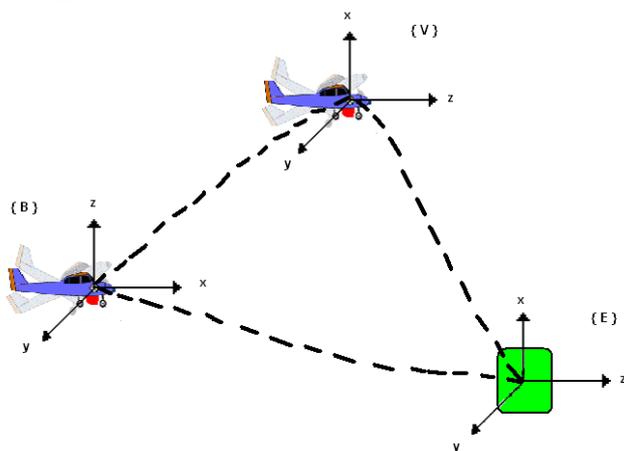


Fig. 5. Problemática com sistemas de coordenadas convencionados por D-H

Existe uma relação entre os dois sistemas de coordenadas após aplicação da notação de D-H que nos fornece a posição e orientação final do VANT que são dadas por “(4)” e “(5)”.

$${}^B_V T = [{}^B_V T] \cdot [{}^E_V T]_{P2_x} \cdot [{}^E_V T]_{P2_y} \cdot [{}^E_V T]_{P1_x} \cdot [{}^E_V T]_{P1_y} \quad (4)$$

$${}^E_V T = [{}^B_V T]^{-1} \cdot [{}^B_V T] \cdot [{}^E_V T]_{P1_x} \cdot [{}^E_V T]_{P1_y} \cdot [{}^E_V T]_{P2_x} \cdot [{}^E_V T]_{P2_y} \quad (5)$$

Qualquer orientação também pode ser descrita (ou a atitude de um corpo pode ser atingida partindo-se de uma atitude arbitrária de referência) por um ângulo e um eixo de rotação definido com respeito a um sistema de coordenadas de referência. Na referência “[5]” é enfatizada uma abordagem com mais detalhes da rotação em torno de um eixo genérico na qual chamamos convenientemente de *Ângulo-Eixo Equivalente*.

#### V. MÉTODO DO GRAFO DE TRANSFORMAÇÕES

Este método é uma abordagem alternativa para a problemática da Fig 4. Ele é baseado em conceitos de geometria euclidiana e apresenta mais facilidade de compreensão e de visualização em relação à notação de D-H. Uma desvantagem é a constante necessidade de considerar informações dadas em relação à {B}, {V} e {E}.

##### Grafo de Transformações

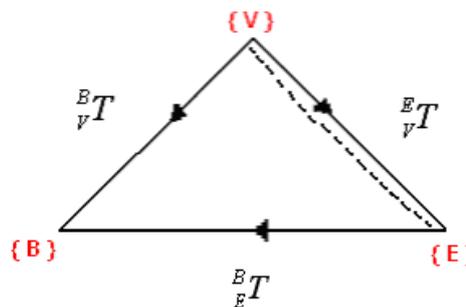


Fig. 6. Modelagem matemática através do grafo de transformações

Considerando o alvo conhecido  ${}^E_V T$  e informações da base  ${}^B_V T$  podemos determinar a posição e orientação final do VANT em relação ao ponto inicial de partida (base) que é dada por “(6),” assim como o método de D-H. Considerando novamente uma situação de vôo ao qual o VANT sofra uma possível rotação de  $\theta^\circ$  em torno do eixo z, a sua posição seja estimada em relação à base e ao edifício através de imagens de posições de pontos centrais; pode-se determinar a nova posição do VANT em relação ao EDIFÍCIO dada por “(7).”

$${}^B_V T = [{}^B_V T] \cdot [{}^E_V T]_{P2} \cdot [{}^E_V T]_{P1} \quad (6)$$

$${}^E_V T = [{}^B_V T]^{-1} \cdot [{}^B_V T] \cdot [{}^E_V T]_{P1} \cdot [{}^E_V T]_{P2} \quad (7)$$

#### VI. RESULTADOS

Os resultados são obtidos utilizando um ambiente de simulação e testes em laboratório. Os erros da estimação da posição do VANT são apresentados na Tabela I.

TABELA I: EFICIÊNCIA DOS MÉTODOS

ERROS (%)	D-H	GRAFO
Coordenada – X	0 %	0.025 %
Coordenada – Y	0 %	0.12 %
Coordenada – Z	0 %	12.83 %
Média	0 %	4.325 %

## VI. CONCLUSÕES

A problemática em estudo foi solucionada com aplicação da notação de Denavit-Hartenberg que permitiu localizar o VANT de maneira estimada com sucesso, sem atribuir *frames* arbitrários ou aleatórios. Nessa fase de desenvolvimento, buscou-se melhorar a eficiência dos métodos minimizando a média dos erros. As maiores vantagens em relação ao método que faz uso de Grafos de Transformações foram às poucas informações de vôo ao qual necessita-se para determinar os parâmetros de D-H e exatidão nos erros de coordenadas x, y e z conforme tabela I. Já com método de Grafo de Transformações; notou-se que o VANT apresentou orientação e posição diferentes em {B} e {V}. Esse método também se mostrou menos complexo do que o método D-H, porém com uma maior variação angular sobre o eixo equivalente, ou seja, o VANT sofreu rotações. A maior desvantagem dele em relação à D-H foram as muitas considerações feitas sobre a problemática estudada.

## REFERÊNCIAS

- [1] J. Denavit, and R. Hartenberg, "A kinematic notation for lower-pair mechanism base don matrices", *J. Appl. Mech.*, vol. 77, pp 215-221, June 1955.
- [2] P. Corke, "A Simple and Systematic Approach to Assigning Denavit-Hartenberg Parameters", *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 23, no. 3 pp. 590-594, June 2007.
- [3] H. Asada, *Robot Analysis and Control*, vol. 1. Wiley: New York, 1986, 266 p.
- [4] R. P. Paul, *Robot Manipulators: Mathematics, Programming, and Control*. Cambridge, MA: MIT Press, 1981.
- [5] A. Adade Filho, *Fundamentos de Robótica*, Versão 2.02, vol. 1. CTA-ITA-IEMP: São José dos Campos, 2001, pp. 47-53.
- [6] P. Corke, "Machine vision toolbox," *IEEE Robot. Autom. Mag.*, vol. 12, pp. 16-25, Nov. 2005.
- [7] N. C. Silva, and J. M. Rosário, "Introduction to Intermediary Frame Concept, for the Analytic Study of the Kinematics models in Anthropomorphic Limb and Prostheses." *Proceedings of the 22<sup>d</sup> Annual EMBS International Conference*, July 23-28,2000, Chicago IL.
- [8] Fu K. S., *Robotics: control, sensing, vision, and intelligence*, vol. 1. McGraw-Hill: New York, 1987, 580 p.