



PALAVRAS CHAVES/KEY WORDS  
SISTEMAS AUTÔNOMOS DE NAVEGAÇÃO  
ROBÓTICA  
INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL, PLANEJAMENTO

AUTORIZADA POR/AUTHORIZED BY  
*Marco Antônio Raupp*  
Diretor Geral

AUTOR RESPONSÁVEL  
RESPONSIBLE AUTHOR  
*C. A. Marques Nogueira*  
C. A. Marques Nogueira

DISTRIBUIÇÃO/DISTRIBUTION  
 INTERNA / INTERNAL  
 EXTERNA / EXTERNAL  
 RESTRITA / RESTRICTED

REVISADA POR / REVISED BY

CDU/UDC  
681.3.019

DATA / DATE  
Julho, 1988

TÍTULO/TITLE	PUBLICAÇÃO Nº PUBLICACION NO INPE-4617-PRE/1340
	O PROBLEMA DE PLANEJAMENTO EM UM SISTEMA DE NAVEGAÇÃO VISUAL
AUTORES/AUTHORSHIP	C. A. Marques Nogueira Valter Rodrigues

ORIGEM  
ORIGIN  
LAC

PROJETO  
PROJECT  
INTAL

Nº DE PAG.  
NO OF PAGES  
11

ULTIMA PAG.  
LAST PAGE  
05

VERSÃO  
VERSION

Nº DE MAPAS  
NO OF MAPS

RESUMO - NOTAS / ABSTRACT - NOTES

A representação do conhecimento do ambiente necessário ao planejamento automático de caminhos é um problema importante nas aplicações com robôs móveis. Neste artigo é apresentada uma forma de representação hierárquica desse conhecimento. Essa representação permite explorar atributos de visibilidade do ambiente que resultam em uma redução no caminho final planejado. Atualmente sobre a representação existe um sistema de planejamento que permite a realização da geração e monitoramento do plano simultaneamente. A representação utilizada dá ao sistema a capacidade de aprendizagem a respeito do ambiente e dos obstáculos encontrados durante a realização de uma tarefa.

OBSERVAÇÕES/REMARKS  
Submetido para apresentação no 7º Congresso Brasileiro de Automática, 15 a 19 de agosto de 1988, São José dos Campos, SP.

• •

## SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
LISTA DE FIGURAS .....	iii
1 - INTRODUÇÃO .....	1
2 - O SISTEMA DE NAVEGAÇÃO VISUAL (SNV) .....	2
3 - SISTEMAS AUTÔNOMOS DE NAVEGAÇÃO PARA AMBIENTES NÃO ESTRUTURADOS .....	2
4 - A REPRESENTAÇÃO DO CONHECIMENTO .....	3
5 - A REPRESENTAÇÃO DO CONHECIMENTO NO SNV .....	3
6 - O PLANEJADOR .....	4
7 - APRENDIZAGEM .....	5
8 - CONCLUSÃO .....	5
9 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	5



LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
1 - Diagrama Funcional do SNV .....	2
2 - a) Modelo geométrico da casa; b) Grafo do 1º nível	3
3 - Modelo geométrico do compartimento .....	4
4 - Grafo de conectividade .....	4



A dactilografia de todas as páginas (exceto a 1ª página) deve começar aqui

Typing for all pages (with the exception of page 1) should commence here

LAYOUT PARA A PRIMEIRA PAGINA

LAYOUT FOR THE FIRST PAGE

gação. A seguir, na parte 5, apresenta-se a representação adotada para o SNV. Na parte 6 apresenta-se o planejador que faz uso dessa representação e como ele funciona. Na parte 7 apresenta-se como funciona a aprendizagem do SNV. Por fim, na parte 8, são apresentadas as principais conclusões do trabalho.

2. O SISTEMA DE NAVEGAÇÃO VISUAL (SNV)

O Sistema de Navegação Visual (SNV) é um sistema que deve ser capaz de navegar em um ambiente qualquer, estruturado ou não, e realizar tarefas de interpretação visual (reconhecimento de obstáculos, caminhos livres, etc.).

Assim como o Intelligent Mobile Platform (IMP) (Crowley, 1984), o SNV é projetado para responder a comandos do tipo "Va para (lugar)" onde lugar representa uma posição (x, y). Ao contrário do IMP entretanto, o lugar não necessita ser uma posição previamente aprendida pelo sistema ("pre-learned").

Além disso o SNV tem capacidade de atender comandos do tipo "Encontre (objeto)". Nesse caso o SNV fará uma consulta ao Modelo Representacional do Ambiente e se dirigirá até o local onde se encontra o objeto especificado.

Como pode ser observado da Figura 1, o planejador ocupa o nível mais alto na hierarquia de controle do sistema. Cabe a ele armazenar as metas solicitadas, gerar planos capazes de alcançar essas metas, monitorar o desenvolvimento dos planos gerados e refazer planos em situações emergenciais.

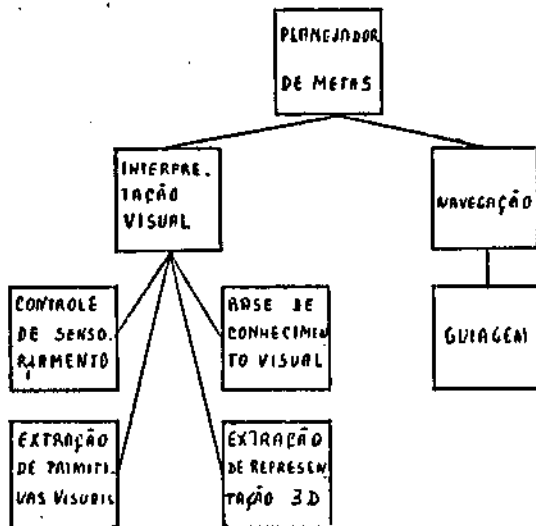


Fig. 1: Diagrama Funcional do SNV

Ao subsistema de navegação caberá a otimização do plano gerado pelo subsistema planejador, cuidando da maneira como o SNV deverá desviar-se de cada obstáculo.

No nível mais baixo da parte referente à navegação encontra-se o sistema de guiagem. Esse subsistema é responsável pela conversão das trajetórias e ações de deslocamento planejadas em operações diretas de controle fi-

sico de deslocamento (ex. virar a esquerda, frear, manter velocidade, frear bruscamente, etc.).

Na parte de percepção, o subsistema de interpretação visual tem sob sua responsabilidade o controle do sensoriamento, da extração de primitivas visuais, da estratégia de reconhecimento, da extração e representação de formas 3D e do manuseio da base de conhecimento visual.

Para o bom cumprimento das atividades de navegação é imprescindível que o subsistema de navegação receba um número considerável de informações do subsistema de percepção. Assim, muitas das informações podem circular diretamente entre a percepção e a navegação sem que o planejador tome conhecimento disso.

O sistema apresenta ainda um módulo de aprendizagem que lhe permite atualizar o modelo do mundo sempre que aparecer um novo objeto ou o objeto mudar de lugar.

3. SISTEMAS AUTÔNOMOS DE NAVEGAÇÃO PARA AMBIENTES NÃO ESTRUTURADOS

Um problema central no que diz respeito à navegação de robôs inteligentes é o do planejamento automático do caminho a ser utilizado. Dada uma posição de destino a ser alcançada, o robô deverá ser capaz de se orientar pelo ambiente, desviando-se dos obstáculos e fazendo as mudanças necessárias de direção para alcançar a meta (posição de destino) especificada.

No caso do robô encontrar-se em uma região totalmente desconhecida para ele, não haverá muito o que planejar com relação a trajetória. O problema é semelhante ao de uma pessoa, carregando uma bússola, que é deixada em uma região desconhecida.

Uma heurística capaz de resolver o problema é seguir a direção exata do ponto de destino no desviando-se dos obstáculos que aparecem a sua frente. Um procedimento de navegação seguindo essa heurística é apresentado a seguir.

1. Determinar a posição atual.
2. Dirigir a câmera para a posição meta.
3. Enquanto a posição atual for diferente da posição meta faça:
  - 3.1- Averiguar se o caminho está livre
    - 3.2- Se estiver livre
      - 3.2.1- Então siga
        - 3.2.2- Senão
          - 3.2.2.1- Localize uma extremidade do obstáculo
            - 3.2.2.2- Vá até a extremidade localizada
            - 3.2.2.3- Dirija a câmera para a posição meta.

Este tipo de comportamento não seria adequado quando no caso do sistema estar dentro de um ambiente estruturado onde os obstáculos (objetos), suas localizações e disposições relativas sejam conhecidos e o sistema tenha a capacidade de representar fielmente esse conhecimento através de um modelo interno facilmente manipulável. Considerando tratar-se de um sis-

A datilografia de todas as páginas (exceto a 1ª página) deve começar aqui

Typing for all pages (with the exception of page 1) should commence here

LAYOUT PARA A PRIMEIRA PAGINA

LAYOUT FOR THE FIRST PAGE

tema baseado em conhecimento, deve-se esperar dele capacidade de utilizar este conhecimento topológico do ambiente no qual está inserido além de conhecimentos de manipulação de veículos e raciocínio geométrico para fazer o planejamento do caminho a ser adotado. Dessa forma o planejador deve ser capaz de tomar as medidas necessárias para desviar-se previamente dos obstáculos que surgem no caminho para a posição meta.

Como representar esse conhecimento topológico acerca do ambiente é tratado no próximo item.

#### 4. A REPRESENTAÇÃO DO CONHECIMENTO

Em se tratando de um ambiente estruturado, é de grande importância reconhecer as regiões de espaço livre por onde o robô pode transitar.

Lozano-Perez (1979, 1981) procura reduzir o robô a uma referência pontual ao mesmo tempo que expande os obstáculos de acordo com a forma do robô. Feito isso, constrói-se um grafo de visibilidade onde cada arco representa a existência de um caminho reto, livre de obstáculos, entre o robô e um vértice expandido.

Moravec (1980) utiliza idéia semelhante só que delimitando os objetos e obstáculos expandidos através de círculos ao invés de polígonos.

Brooks (1983) usa a sobreposição de cones generalizados para representar o espaço livre. Os eixos dos cones representam canais pelos quais o robô pode transitar entre dois objetos. O problema de planejamento de um caminho fica solucionado através de uma busca no grafo de conectividade onde cada nó corresponde a intersecção de dois eixos e cada arco representa o eixo de um cone.

Chatila (1982) utiliza-se de polígonos convexos para representar espaços livres. Tem-se então um grafo de conectividade no qual cada nó representa um polígono convexo dentro do qual quaisquer dois pontos podem ser ligados por uma reta sem interseccionar qualquer dos lados. Os arcos correspondem a lados comuns entre dois polígonos adjacentes.

Kuan e co-autores (1984) procuraram se utilizar de uma representação mista: cones generalizados e polígonos convexos. Os cones generalizados são utilizados para a representação de espaços estreitos entre dois obstáculos vizinhos. Os polígonos convexos são utilizados para representarem regiões livres maiores. Pearson e Kuan (1985) fazem uso dessa mesma representação.

#### 5. A REPRESENTAÇÃO DO CONHECIMENTO NO SNV

No caso do SNV procurou-se utilizar uma estrutura de polígonos convexos, parecida aquela utilizada por Laumond (1983), aliada ao engrandecimento de obstáculos proposto por Lozano-Perez (1979, 1981).

A partir da Figura 2a procura-se fazer uma interpretação top-down do ambiente em

questão. Em um primeiro nível representa-se o ambiente através de um grafo onde cada nó corresponde a um compartimento enquanto cada arco representa uma ligação entre dois compartimentos. O grafo da Figura 2b representa esse primeiro nível de abstração.

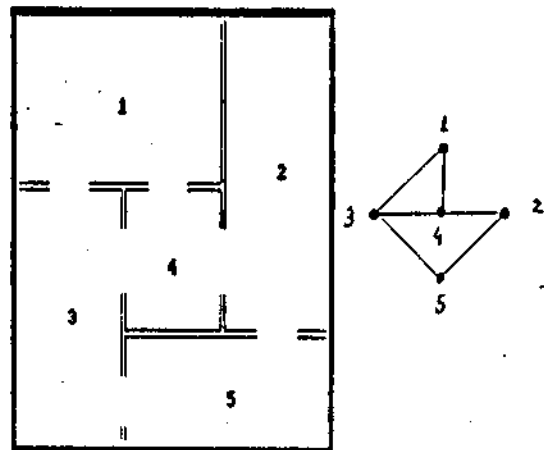


Fig. 2: a) Modelo geométrico da casa. b) Grafo do 1º nível.

Cada nó dessa rede é representado por uma estrutura de frame na qual constam as informações que lhe são relevantes: os obstáculos do compartimento, altura das portas, grafo de conectividade, etc. Cada obstáculo pode ter seu próprio frame também.

O grafo de conectividade, único por compartimento, representa o segundo nível de detalhamento da nossa representação. Para se representar o grafo é preciso antes dividir o compartimento em polígonos convexos. Os polígonos convexos têm a propriedade de que quaisquer dois pontos do seu interior podem ser ligados por uma reta sem intercepar nenhum dos lados. A Figura 3 representa um compartimento qualquer e a Figura 4 representa o grafo de conectividade originado dele.

Nesse grafo tem-se dois tipos de nós representando respectivamente regiões e obstáculos. Os arcos também podem ser de dois tipos: de ligação e de vizinhança. Os arcos de ligação são usados entre duas regiões e demonstram a existência de um lado comum entre os polígonos convexos que representam cada uma dessas duas regiões. Os arcos de vizinhança são usados entre uma região e um obstáculo simbolizando a existência de ao menos um ponto em comum entre a região e o obstáculo. No grafo da Figura 4 os nós-regiões aparecem cheios enquanto os nós-obstáculos aparecem vazios. Os arcos de ligação são representados por linhas cheias enquanto os arcos de vizinhança aparecem em linha tracejada.

Uma vantagem dessa representação é a sua abertura para a representação de níveis de abstração maiores e menores (maiores no ca



A distribuição de todos os planos (exceto o 1º plano) deve conter a seguinte

Typing for all pages (with the exception of page 1) to the common style

LAYOUT PARA A PRIMEIRA PÁGINA

LAYOUT FOR THE FIRST PAGE

so de representarmos ruas, cidades, etc. e menores no caso de se procurar representar objetos côncavos como a reunião de regiões convexas).

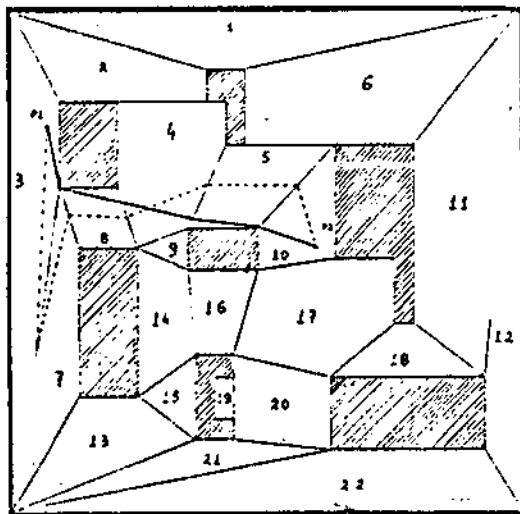


Fig. 3: Modelo geométrico do compartimento.

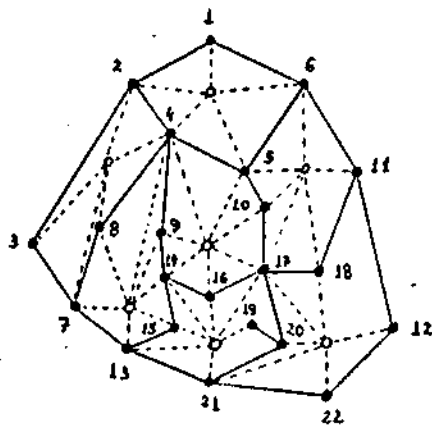


Fig. 4: Grafo de conectividade.

6. O PLANEJADOR

Escolhida uma representação capaz de tratar adequadamente todo conhecimento relevante ao problema de navegação voltamos ao problema do planejador.

Esse subsistema é o responsável pela manipulação do conhecimento para a geração do plano de navegação do SNV. Além disso ele deve monitorar a execução do plano e refazer o plano no caso de se encontrar situações não previstas no plano inicial (por exemplo, presença de um objeto até então desconhecido na rota do SNV).

Dessa forma o planejador deve receber dados passados pelos subsistemas de interpretação visual, navegação, guagem e sensoriamen to. Esses dados serão usados de modo a permitir operar o sistema preditivamente no que

tange ao sensoriamento do SNV e ao controle dos demais módulos.

Inicialmente o planejador procura por um caminho no grafo do primeiro nível onde estão representados apenas os compartimentos e as passagens. Esse tipo de encaminhamento hierárquico adotado aqui permite a especificação de um plano mais geral que é depois detalhado até transformar-se no plano final. Uma outra vantagem dessa estrutura hierárquica é que nela as buscas são feitas em grafos menores evitando assim o risco da explosão combinatoria.

No caso de tentar-se planejar um caminho ligando dois pontos quaisquer de um mesmo compartimento, P1 e P2 (vide Figura 3), o procedimento adotado é o seguinte:

1. Encontrar as regiões R1 e R2 que contém os pontos P1 e P2 ou os objetos com os quais o SNV vai raciocinar para posterior navegação.
2. Achar um caminho dentro do grafo de conectividade ligando os nós representativos das regiões R1 e R2.
3. Ligar o ponto em que se encontra (P<sub>atual</sub>) ao ponto do segmento fronteira da região seguinte do caminho C que esteja mais próximo do segmento imaginário P<sub>atual</sub>P2. No início, P<sub>atual</sub> = P1. Repetir esse passo até que P<sub>atual</sub> = P2.

Uma comparação entre a trajetória encontrada aqui e aquela obtida por Laumond(1983) pode ser vista na Figura 3 (em tracejado encontra-se a trajetória obtida seguindo a estratégia sugerida por Laumond).

No intuito de tornar mais clara a apresentação do procedimento assumiu-se o SNV como pontual já tendo sido feito o engrandecimento de regiões.

Detalhada a trajetória pode-se fazer o monitoramento de sua execução. Os nós obstáculos assim como os arcos de vizinhança têm grande importância nessa fase de monitoramento. Eles permitem criar uma expectativa a respeito do local por onde se está navegando. Além disso os nós obstáculos são de grande importância na estimativa da posição do veículo. A marcação dos pontos nos obstáculos é mais precisa que aquela provida pelo SNV durante seu deslocamento, podendo por isso ser usada na correção do valor estimado para a posição do SNV.

No caso de alguma falha o planejador é ativado para refazer seu plano a partir do ponto de falha. O fato de replanejar não implica necessariamente em uma perda total do plano anteriormente feito. Em muitos casos, feita uma pequena alteração na trajetória, o SNV volta a seguir o mesmo caminho previamente planejado.

Em verdade, o plano não precisa ser gerado em sua completude para iniciar-se a execução. Detalhado o caminho do SNV na primeira região, esse caminho é passado para o subsistema de navegação. Enquanto uma parte do planejador monitora a execução desse ca

Admission de  
1000 a 15000  
exceto a 1ª página  
deve estar equi-

Typeset all pages  
(with the exception  
of page 1) should  
commence here

LAYOUT FOR A  
FIRST PAGE

LAYOUT FOR  
THE FIRST PAGE

minho uma outra parte continua detalhando o restante do plano. Supondo que o caminho gerado tenha 10 regiões, o planejador detalha a trajetória na primeira região apenas e em via essa trajetória para o subsistema de navegação reduzindo assim "elapsed time" (tempo que leva para o SNV começar a atuar). A medida que as trajetórias nas demais regiões vão sendo detalhadas seus planos entram numa lista de tarefas a executar que é consultada pelo subsistema de navegação assim que a navegação em uma região tem seu fim.

#### 7. APRENDIZAGEM

Sempre que o SNV se aperceber de um objeto que não conste no seu Modelo Representacional do Ambiente (MRA) ele realizará um procedimento de reconhecimento junto ao objeto e dará continuidade a tarefa que lhe foi especificada. Atingida a meta, o próprio sistema se encarregará de atualizar o MRA de modo a levar em consideração as informações adquiridas do novo objeto. O sistema deve também, a partir das informações do objeto, ser capaz de inferir as demais relações deste com o ambiente em que se encontra.

Esta capacidade de aprendizagem permite ao sistema aperfeiçoar cada vez mais seu conhecimento acerca do ambiente permitindo consequentemente a escolha de melhores caminhos.

#### 8. CONCLUSÃO

A representação adotada aqui mostrou-se particularmente interessante por três motivos:

1. Permite a extração de restrições de visibilidade que levam a uma redução no caminho total percorrido.
2. é aberto a representação de níveis de abstração maiores e menores.
3. é utilizada tanto para a geração quanto para o monitoramento do plano.

Com relação ao planejador propriamente dito é apresentado a viabilidade de se fazer um plano hierárquico geral inicialmente e procurar depois detalhar cada parte conjuntamente com o processo de monitoramento tal como o comportamento humano.

Em se tratando do SNV merece ressaltar sua capacidade de aprendizagem. Graças a ela o SNV pode, sem intervenção do usuário, adaptar-se as modificações ocorridas no ambiente atualizando sempre que necessário sua representação.

#### 9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Brooks, R. A. (1983). "Solving the Find-Path Problem by Good Representation of Free Space". IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics, Vol. SMC-13, No. 2:190-197.
- Chatila, R. (1982). "Path Planning and Environment Learning in a Mobile Robot System". Proceedings ECAI-82.

Crowley, J. L. (1984). "Navigation for a Mobile Robot". Proceedings CAIA-84: 79-84.

Kuan, D. T. & Brooks, R. A. & Zamiska, J. C. & Das, M. (1984). "Automatic Path Planning for a Mobile Robot Using a Mixed Representation of Free Space". Proceedings CAIA-84: 70-74.

Laumond, J. P. (1983). "Model Structuring and Concept Recognition: Two Aspects of Learning for a Mobile Robot". Proceedings IJCAI-83: 839-841.

Lozano-Perez, T. & Wesley, M. A. (1979). "Algorithm for Planning Collision-Free Paths Among Polyhedral Obstacles". Communications of the ACM, Vol. 22, No. 10:560-570.

Lozano-Perez, T. (1981). "Automatic Planning of Manipulator Transfer Movements". IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics, Vol. SMC-11, No. 10:681-698.

Moravec, H. P. (1980). "Obstacle Avoidance and Navigation in the Real World by a Seeing Robot Rover". Stanford University Tech. Rep., AIM-340.

Pearson, G. & Kuan, D. (1985). "Mission Planning System for an Autonomous Vehicle". Proceedings CAIA-85:162-167.

Não ultrapasse esta linha

Redução de 10 para 8

FAVOR NÃO DOBRAR ESTA FOLHA

PLEASE DO NOT FOLD THIS SHEET