

ROBÔ DE COMBATE A INCÊNDIOS: TRAJETÓRIAS CAÓTICAS E VISÃO INTELIGENTE

Magda J. M. Tavera, mjmtavera@ufrj.br¹

Max Suell Dutra, Max@mecanica.coppe.ufrj¹

Omar Lengerke, olengerke@ufrj.br^{1,2}

Hernan Gonzalez Acuña, hgonzalez3@unab.edu.co²

¹Universidade Federal do Rio de Janeiro, Cidade Universitária – Centro de Tecnologia – Bloco I - 101

²Universidad Autónoma de Bucaramanga, Calle 48 No. 39-234 Bucaramanga - Colombia

Resumo: *A vigilância e combate a incêndios é conhecida como uma missão arriscada, situação que os bombeiros enfrentam perigosamente quando estão extinguindo o fogo ou resgatando as vítimas; sendo esta uma parte inerente à profissão. Em contraste, um robô pode funcionar autonomamente ou controlado desde uma distância segura para executar este tipo de labores sem colocar em risco a vida do bombeiro, sendo esta a motivação do presente artigo, onde um robô dotado de visão inteligente recebendo sinais de sensores especializados e um controle caótico poderia reduzir prejuízos humanos, materiais e ambientais. Neste artigo, é proposto implantar natureza caótica a um robô móvel, com o objetivo de fazer inspeção de um ambiente com trajetórias não determinadas, auxiliadas com sistemas de sensores e visão inteligente. O caos caracteriza um dos comportamentos mais ricos e misteriosos dos sistemas dinâmicos não lineares, caracterizados pela topologia transitiva e a dependência nas condições iniciais. O comportamento caótico do robô móvel proposto se consegue incorporando nas equações cinemáticas do robô a equação de Arnold sendo uma equação conhecida que apresenta comportamento caótico.*

Palavras-chave: *Robôs de Combate a incêndios, Caos, Visão Estéreo.*

1. INTRODUÇÃO

O fogo foi descoberto a partir do momento da percepção humana. Ele esteve presente na formação do universo e foi uma ferramenta do homem para iniciar seu caminho rumo à civilização. Desde então, criamos certa dependência, seja para aquecimento, fonte de luz ou energia, sendo considerado o motor da indústria na vida diária. A humanidade há realizado um alto investimento em tecnologia para mantê-lo, mas relativamente pouco para impedi-lo. São claros os casos dramáticos assim como os grandes incêndios que têm sido registrados na história, os que têm causado mais temor do que ensino (Figura 1). Provavelmente a pouca frequência de ter uma experiência desagradável em um incêndio, origina o esquecimento ao em vez de certo aprendizado.



Figura 1. (a) Incêndio na escola nossa senhora dos anjos, Chicago, Illinois, dezembro de 1958. (b) Incêndio no teatro Iroquois, Chicago, Illinois, 30 de dezembro de 1903 (Burke, 2008).

Com o avanço da sociedade os valores dependem do que é produzido e das fontes de produção. No entanto, como os meios para adquirir os produtos se tornam mais fáceis, os valores modificam o aperfeiçoamento do bem-estar da sociedade em geral e de nosso ambiente. O fogo descontrolado pode ter caráter devastador nos bens, fontes de produção relacionada com os custos sociais dos incêndios, a prevenção e a recuperação de perdas. Os efeitos do fogo sobre as pessoas e o ambiente, são questões sociais que dependem da ideologia política e econômica que prevalece no estado. Assim, a atenção à prevenção e controle de incêndios depende do potencial de dano percebido e os valores sociais no estado (Quintiere, 2006).

2. ESTADO DA TÉCNICA

As aplicações da robótica vão hoje desde as associadas à substituição do homem em tarefas repetitivas, não interessantes, suscetíveis de erro, degradantes ou subutilizadoras das suas capacidades e sensibilidade, até as associadas à assistência a pessoas inválidas ou idosas, e vigilância ou operação em ambientes hostis (ambientes nocivos, zonas profundas dos mares, espaço, etc.). Dispositivos robóticos têm sido desenvolvidos com várias configurações e objetivos. Os mais comuns são sem dúvida os manipuladores robóticos. Estes manipuladores de base fixa são, no entanto, limitados no seu volume de trabalho. O alargamento do volume de trabalho está sendo realizado pelos robôs móveis. Os robôs móveis começam a ser utilizados em ambientes industriais para transporte de peças entre as estações de fabricação e de armazenagem, entre outras aplicações (Gaspar, 1994, Lengerke *et al.*, 2008). Um robô móvel consiste em uma plataforma móvel sobre a qual é integrada de forma inteligente, percepção e ação sobre o mundo que rodeia o robô. A “ação” guia e controla o robô durante o seu movimento pelo mundo. A “percepção” recolhe os dados dos sensores, interpreta-os de modo a melhorar a compreensão do mundo e propõe “ações”. Os robôs são utilizados em ambientes que mudam rapidamente e em situações de alto risco, como as operações de resgate em ambientes radioativos, incêndios ou operações militares. Os robôs são enviados nesses ambientes para vários objetivos com vista à realização de diversas tarefas (Ruuth *et al.*, 2007).

2.1. Robôs Utilizados em Vigilância, Busca e Salvamento

Os robôs urbanos de busca e salvamento (*Urban Search-And-Rescue - USAR*) têm uma história relativamente curta e seu uso é relativamente novo (Murphy, 2004). A firma de serviços Inuktun, realizou a primeira pesquisa documentada em 1993; embora o interesse acadêmico destes robôs evoluísse desde 1995 com o atentado na cidade de Oklahoma e com os terremotos no Japão. O primeiro documento de utilização de robôs em busca e salvamento foi logo após 11 de setembro de 2001, no rescaldo do desastre do *World Trade Center* (Figura 2). O tenente coronel Jhon Blich (atualmente aposentado) levou militares, comerciais e grupos de robótica de distintas universidades dos Estados Unidos para ajudar nos esforços. Embora os robôs utilizados na pesquisa não fossem originalmente concebidos para USAR, seu bom desempenho durante o resgate revelou um valor fundamental como ferramentas nesse tipo de incidentes. Como sucede com qualquer evento pela primeira vez, as dificuldades e os relacionamentos dentro do ambiente foram identificados. Isto forneceu uma base sólida para o desenvolvimento futuro de robôs de busca e salvamento (Kajiwara *et al.*, 1989, Shimosasa *et al.*, 1999, Das *et al.*, 2003, Lewis *et al.*, 2005, Tadokoro, 2005, Chonnaparamutt e Birk, 2006, Micire, 2007, Zhuang *et al.*, 2008).

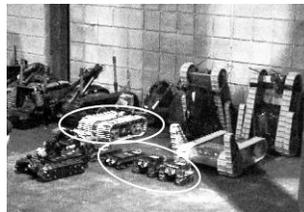


Figura 2. Robôs utilizados no desastre do *World Trade Center*.

2.2. Robôs Contra Incêndios

Na área de robôs de combates a incêndios existem diversos trabalhos de pesquisa, incluindo alguns concursos que foram inspirados pela curiosidade de conhecer a ciência do fogo e pelo compromisso de aportar no conhecimento nessa difícil tarefa (Bradshaw, 1991, Ahlgren, 2001, Nist, 2002, Baltes *et al.*, 2002, Setiawan *et al.*, 2007). Nos trabalhos mais relevantes está o trabalho do Liljebäck *et al.* (2006) que apresenta o conceito de *SnakeFighter* na forma de um robô cobra hidráulica focado nas tarefas de intervenção nos incêndios (Figura 3a). Os robôs com rodas ou lagartas são hoje as tecnologias mais avançadas da robótica móvel (Martínez *et al.*, 2005). A desvantagem desse tipo de sistemas, entretanto, é a sua mobilidade limitada em ambientes com obstáculos desafiadores. O conceito de *SnakeFighter* se baseia na ideia de permitir que uma mangueira de incêndio possa-se movimentar como uma cobra biológica e executar a intervenção em um incêndio por conta própria.

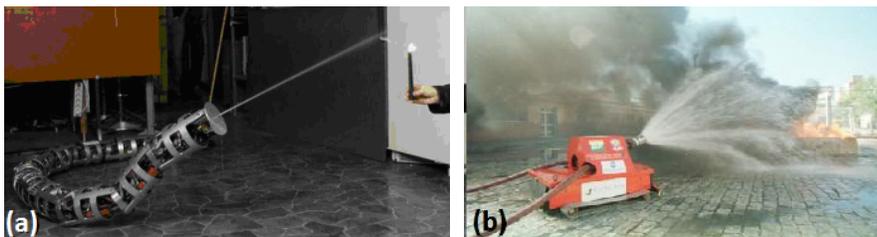


Figura 3. (a) Robô cobra hidráulica (*SnakeFighter - Anaconda*). (b) Robô SACI da Armtec.

A empresa ARMTEC no Brasil desenvolveu um bombeiro remotamente operado chamado SACI (Sistema de Apoio ao Combate de Incidentes) (Figura 3b). Ao contrario do projeto *SnakeFighter*, este dispositivo é alimentado por baterias. O robô é imune à fumaça e ao calor externo, podendo extinguir as chamas de diversas formas: com fluxo direto, explosão de espuma, ou com alto alcance.

No trabalho do Chien *et al.* (2007) é desenvolvido um sistema multissensorial inteligente baseado em um sistema de segurança em um robô de combate a incêndio. De igual forma foi projetado um robô com extintores para ser utilizado em edifícios inteligentes (Figura 4a) (Su, 2006). Na continuação dos dois projetos anteriores, Luo *et al.* (2007) propõe um algoritmo de fusão adaptativa para detecção de fogo que utiliza sensores de fumaça, de chama e de temperatura, com a finalidade de detectar esse tipo de incidentes. O módulo de detecção do fogo é implementado em tempo real no robô inteligente de segurança chamado *Chung Cheng I* (Figura 4b). Se ocorrer um incidente, o robô pode encontrar a fonte do fogo utilizando o módulo de detecção e transmite uma mensagem para o usuário, através da internet ou de um telefone celular.

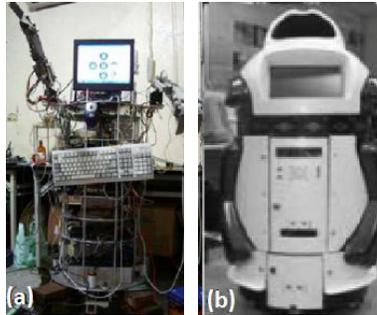


Figura 4. (a) Estrutura do robô de combate a incêndios (Su, 2006). (b) Robô *Chung Cheng I* (Luo *et al.*, 2007).

3. O ROBÔ MÓVEL CAÓTICO

O caos caracteriza um dos comportamentos mais ricos e misteriosos dos sistemas dinâmicos não lineares. Diversas pesquisas têm sido realizadas para estabelecer a teoria matemática por trás do caos. Aplicações de caos são também estudadas, como exemplos estão os controles do caos e as redes neurais caóticas na procura de regras subjacentes simples (Freeman, 1994). A continuação um estudo de trajetórias especiais é apresentado para robôs móveis, baseadas nas características dinâmicas de sistemas caóticos, obtidas pela concepção de um controlador com características caóticas (Martins-Filho *et al.*, 2004, Jansri *et al.*, 2004). A transitividade topológica, propriedade dos movimentos caóticos garante a conexão completa com o espaço de trabalho (Nakamura *et al.*, 2001). Este método de construção de trajetórias está previsto para missões de exploração do terreno (ambiente), com o propósito específico de pesquisa ou de patrulha, onde é necessária uma rápida varredura do espaço de trabalho do robô.

3.1. O Robô Móvel

Para este estudo em particular no modelo matemático, é assumido um robô móvel de duas rodas (Figura 5). Com uma velocidade linear $v \left[\frac{m}{s} \right]$ e uma velocidade angular $w \left[\frac{rad}{s} \right]$ que são as entradas do sistema.

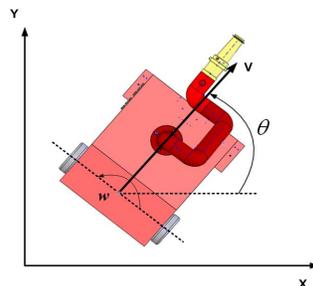


Figura 5. O robô móvel.

A equação de estado do robô móvel é dada por:

$$\begin{pmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\theta & 0 \\ \sin\theta & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v \\ w \end{pmatrix} \quad (1)$$

Onde $(x[m], y[m])$ é a posição do robô e $\theta[rad]$ é o ângulo do robô.

3.2. Equação de Arnold

A fim de gerar movimentos caóticos no robô móvel é utilizada a equação de Arnold, logo:

$$\begin{pmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A \operatorname{sen} x_3 + C \cos x_2 \\ B \operatorname{sen} x_1 + A \cos x_3 \\ C \operatorname{sen} x_2 + B \cos x_1 \end{pmatrix} \quad (2)$$

Onde A , B e C são constantes. A equação de Arnold descreve a solução para três dimensões da equação de Euler, tal que:

$$\frac{\partial v_i}{\partial t} + \sum_{k=1}^3 v_k \frac{\partial v_i}{\partial x_k} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + f_i, \quad \sum_{i=1}^3 \frac{\partial v_i}{\partial x_i} = 0 \quad (3)$$

Que expressa o comportamento de um fluido perfeitamente incompressível em um espaço 3-D. (x_1, x_2, x_3) e (v_1, v_2, v_3) representam a posição e a velocidade de uma partícula. p , (f_1, f_2, f_3) e ρ representam a pressão, a força externa e a densidade respectivamente. Sabe-se que a equação de Arnold apresenta movimento periódico quando umas das constantes, por exemplo, $C = 0$ ou pequeno e apresenta movimento caótico, quando C é grande.

3.2.1. Análise do Comportamento

Para uma análise em 2-D com $x_2 = 0$ o sistema é o seguinte:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = A \operatorname{sen} x_3 + C \\ \dot{x}_3 = B \cos x_1 \end{cases} \quad (4)$$

Igualando a zero as duas equações, localizamos um conjunto de infinitos pontos de equilíbrio $P_{1,2,3\dots} = \{k_i \frac{\pi}{2}, 0\}$, onde k_i é um número ímpar e $P_{4,5,6\dots} = \{k_i \frac{\pi}{2}, k\pi\}$, onde k é um número inteiro. Para avaliar a natureza da estabilidade dos pontos de equilíbrio, o Jacobiano é implementado como:

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial \dot{x}_1}{\partial x_1} & \frac{\partial \dot{x}_1}{\partial x_3} \\ \frac{\partial \dot{x}_3}{\partial x_1} & \frac{\partial \dot{x}_3}{\partial x_3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & A \cos x_3 \\ -B \operatorname{sen} x_1 & 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

Onde os autovalores de uma matriz real e quadrada são as raízes do polinômio característico $\lambda = \pm \sqrt{-A B \operatorname{sen} x_1 \cos x_3}$. O comportamento do sistema para diferentes valores das constantes, nos infinitos pontos de equilíbrio é descrito detalhadamente a continuação:

Comportamento do sistema para diferentes valores de A e B , nos infinitos pontos de equilíbrio $P_{1,2,3\dots} = \{k_i \frac{\pi}{2}, 0\}$; levando em conta que $\cos(0) = 1$

- Para $A > 0$ e $B > 0$ ou $A < 0$ e $B < 0$ quando:
 - $k_i = 1, 5, 9, 13, \dots$ se obtém dois autovalores imaginários, com parte real nula, um positivo e o outro negativo. Por tanto tem-se um centro.
 - $k_i = 3, 7, 11, 15, \dots$ se obtém dois autovalores reais, um positivo e o outro negativo. Por tanto tem-se uma sela.
- Para $A > 0$ e $B < 0$ ou $A < 0$ e $B > 0$ quando:
 - $k_i = 1, 5, 9, 13, \dots$ se obtém dois autovalores reais, um positivo e o outro negativo. Por tanto tem-se uma sela.

- $k_i = 3,7,11,15,\dots$ se obtém dois autovalores imaginários, com parte real nula, um positivo e o outro negativo. Por tanto tem-se um centro.

Comportamento do sistema para diferentes valores de A e B, nos infinitos pontos de equilíbrio $P_{\dots,4,5,6,\dots} = \{k_i \frac{\pi}{2}, k\pi\}$:

- Para $A > 0$ e $B > 0$ ou $A < 0$ e $B < 0$ quando:
 - $k_i = 1,5,9,13,\dots$ e $k_i = \text{par}$ se obtém dois autovalores imaginários, com parte real nula, um positivo e o outro negativo. Por tanto tem-se um centro.
 - $k_i = 3,7,11,15,\dots$ e $k_i = \text{par}$ se obtém dois autovalores reais, um positivo e o outro negativo. Por tanto tem-se uma sela.
 - $k_i = 1,5,9,13,\dots$ e $k_i = \text{ímpar}$ se obtém dois autovalores reais, um positivo e o outro negativo. Por tanto tem-se uma sela.
 - $k_i = 3,7,11,15,\dots$ e $k_i = \text{ímpar}$ se obtém dois autovalores imaginários, com parte real nula, um positivo e o outro negativo. Por tanto tem-se um centro.
- Para $A > 0$ e $B < 0$ ou $A < 0$ e $B > 0$ quando:
 - $k_i = 1,5,9,13,\dots$ e $k_i = \text{par}$ se obtém dois autovalores reais, um positivo e o outro negativo. Por tanto tem-se uma sela.
 - $k_i = 3,7,11,15,\dots$ e $k_i = \text{par}$ se obtém dois autovalores imaginários, com parte real nula, um positivo e o outro negativo. Por tanto tem-se um centro.
 - $k_i = 1,5,9,13,\dots$ e $k_i = \text{ímpar}$ se obtém dois autovalores imaginários, com parte real nula, um positivo e o outro negativo. Por tanto tem-se um centro.
 - $k_i = 3,7,11,15,\dots$ e $k_i = \text{ímpar}$ se obtém dois autovalores reais, um positivo e o outro negativo. Por tanto tem-se uma sela.

São geradas a Tabela 1 e Tabela 2, que exemplificam o concluído anteriormente.

Tabela 1. Natureza da estabilidade dos pontos de equilíbrio para C=0.

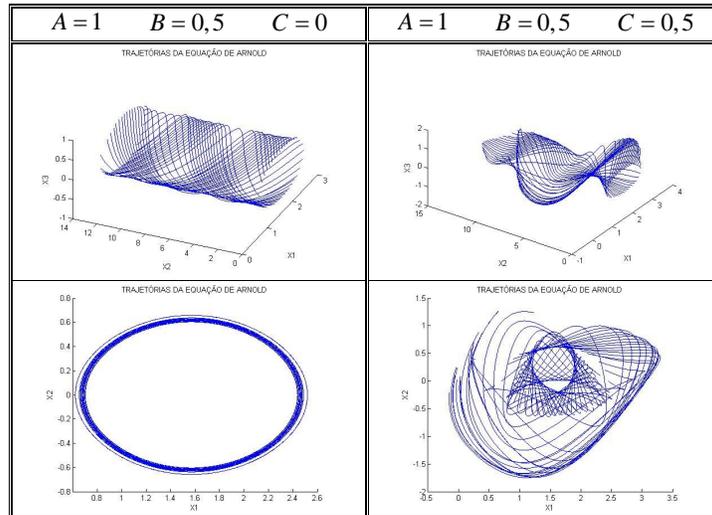
A = 1	B = 0,5	C = 0	
		$P_{1,2,3,\dots} = \{k_i \frac{\pi}{2}, 0\}$	
		$P_1 = \{\frac{\pi}{2}, 0\}$	$\lambda = \pm\sqrt{-0,5}$
		$P_2 = \{-\frac{\pi}{2}, 0\}$	$\lambda = \pm\sqrt{0,5}$
		$P_{\dots,4,5,6,\dots} = \{k_i \frac{\pi}{2}, k\pi\}$	
		$P_3 = \{\frac{\pi}{2}, \pi\}$	$\lambda = \pm\sqrt{0,5}$
		$P_5 = \{\frac{\pi}{2}, -\pi\}$	$\lambda = \pm\sqrt{0,5}$
		$P_4 = \{-\frac{\pi}{2}, \pi\}$	$\lambda = \pm\sqrt{-0,5}$
		$P_6 = \{-\frac{\pi}{2}, -\pi\}$	$\lambda = \pm\sqrt{-0,5}$

Tabela 2. Natureza da estabilidade dos pontos de equilíbrio para C=0,5.

A = 1	B = 0,5	C = 0,5	
		$P_{1,2,3,\dots} = \{k_i \frac{\pi}{2}, 0\}$	
		$P_1 = \{\frac{\pi}{2}, 0\}$	$\lambda = \pm\sqrt{-0,5}$
		$P_2 = \{-\frac{\pi}{2}, 0\}$	$\lambda = \pm\sqrt{0,5}$
		$P_{\dots,4,5,6,\dots} = \{k_i \frac{\pi}{2}, k\pi\}$	
		$P_3 = \{\frac{\pi}{2}, \pi\}$	$\lambda = \pm\sqrt{0,5}$
		$P_5 = \{\frac{\pi}{2}, -\pi\}$	$\lambda = \pm\sqrt{0,5}$
		$P_4 = \{-\frac{\pi}{2}, \pi\}$	$\lambda = \pm\sqrt{-0,5}$
		$P_6 = \{-\frac{\pi}{2}, -\pi\}$	$\lambda = \pm\sqrt{-0,5}$

Quando $C = 0$ é observado que a transitividade topológica não emerge, sendo que as trajetórias na secção de Poincaré estão fechadas. Quando $|C|$ excede certo número, crescem as regiões onde as trajetórias fechadas desaparecem e aparecem pontos discretos dispersos. Estas regiões caracterizam o caos e o seu comportamento. Desde que a equação de Arnold seja um sistema conservativo, é uma característica importante que descreve que a trajetória de um ponto inicial começa em dada região, permanecendo aí e nunca é atraída por uma região fora da trajetória fechada. Na Tabela 3 são identificadas as trajetórias da equação de Arnold variando o parâmetro C .

Tabela 3. Trajetórias da equação de Arnold variando o parâmetro C .



3.2.2. Obtenção dos Expoentes de Lyapunov

Os expoentes de Lyapunov são utilizados como medida da sensibilidade da dependência das condições iniciais, sendo uma das duas características do comportamento caótico (Savi, 2006). Para um sistema n -dimensional há n expoentes de Lyapunov e é possível concluir se o sistema é sensível e dependente às condições iniciais, quando o máximo expoente de Lyapunov é positivo. São calculados os expoentes de Lyapunov da equação de Arnold (Tabela 4).

Tabela 4. Expoentes de Lyapunov.

$A = 0,5$ $B = 0,25$ $C = 0,25$ $x_1 = 4$ $x_2 = 3,5$ $x_3 = 0$	$A = 1$ $B = 0,5$ $C = 0$ $x_1 = 1$ $x_2 = 0$ $x_3 = 0$	$A = 1$ $B = 0,5$ $C = 1$ $x_1 = 1$ $x_2 = 0$ $x_3 = 0$
<p>EXPOENTES DE LYAPUNOV</p>	<p>EXPOENTES DE LYAPUNOV</p>	<p>EXPOENTES DE LYAPUNOV</p>
$\lambda_1 = 0.0444$ $\lambda_2 = 0.0003$ $\lambda_3 = -0.0447$	$\lambda_1 = 0.0008$ $\lambda_2 = -0.0002$ $\lambda_3 = -0.0006$	$\lambda_1 = 0.0436$ $\lambda_2 = -0.0001$ $\lambda_3 = -0.0434$

Para as condições iniciais nas quais aparece um expoente positivo, quer dizer que as equações de Arnold são sensíveis e dependentes das condições iniciais. No caso das equações de Arnold, a soma dos expoentes de Lyapunov $\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 = 0$ se o volume no espaço de estados é conservativo. Isso resulta quando uma trajetória inicia a partir de uma região caótica e não será atraída por atratores como ciclos limites. O total da soma dos expoentes de Lyapunov se tornou um pouco maior que zero devido aos erros de computação numérica.

3.3. Integração de Sistemas: Equação de Arnold e Robô móvel

A fim de integrar a equação de Arnold no controlador do robô móvel, são definidas e utilizadas as seguintes variáveis de estado:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = D\dot{y} + C \cos x_2 \\ \dot{x}_2 = D\dot{x} + B \sin x_1 \\ \dot{x}_3 = \theta \end{cases} \quad (6)$$

Onde A , B e C são constantes. Substituindo na equação (6) a equação do robô móvel:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = Dv \sin x_3 + C \cos x_2 \\ \dot{x}_2 = Dv \cos x_3 + B \sin x_1 \\ \dot{x}_3 = w \end{cases} \quad (7)$$

Por conseguinte, a equação de estado do robô móvel se torna:

$$\begin{pmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x} \\ \dot{y} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A \sin x_3 + C \cos x_2 \\ B \sin x_1 + A \cos x_3 \\ C \sin x_2 + B \cos x_1 \\ v \cos x_3 \\ v \sin x_3 \end{pmatrix} \quad (8)$$

A equação (8) inclui a equação de Arnold, que se comporta caoticamente ou não dependendo dos estados iniciais. São escolhidos os estados nos que a trajetória se comporta caoticamente. Garantindo que uma órbita caótica da equação de Arnold não é atraída para um ciclo limite ou uma órbita quase-periódica. O conjunto de estados evolui para 5-D, que inclui 3-D do fluxo de Arnold. A evolução do estado 2-D complementar é altamente acoplada com o subespaço de 3-D. O acoplamento está fisicamente interpretado pelo fato que o robô móvel se movimenta com uma velocidade constante e sendo dirigido pela terceira variável da equação de Arnold. As entradas para o robô móvel tornam-se contínuas desde que a equação de Arnold seja um sistema contínuo. Embora a equação de Rössler, a equação de Lorenz, e assim por diante são bem conhecidas como sistemas caóticos contínuos e baixos dimensionalmente; a equação de Arnold tem algumas vantagens:

- As estruturas da equação de Arnold e do robô móvel são semelhantes.
- É fácil se lidar porque as variáveis de estado x_1 , x_2 e x_3 são limitadas dentro de um espaço toro 3-D.
- O intervalo de valores de entrada w torna-se $-(|B|+|C|) \leq w \leq (|B|+|C|)$ e adequados para a entrada do robô.
- Os máximos $|\dot{x}_1|$, $|\dot{x}_2|$, $|\dot{x}_3|$ são determinados pelos parâmetros A , B e C .

Os gráficos (Tabela 5 e Tabela 6) mostram exemplos dos movimentos do robô móvel com o controlador proposto, obtido por simulação numérica. Algumas condições iniciais foram propostas a partir de uma região onde as secções de Poincaré não formam uma trajetória fechada (Tabela 6). É observado que o movimento do robô é imprevisível e sensivelmente dependente das condições iniciais.

Tabela 5. Comportamento do robô com condições iniciais propostas em uma região de trajetórias fechadas.

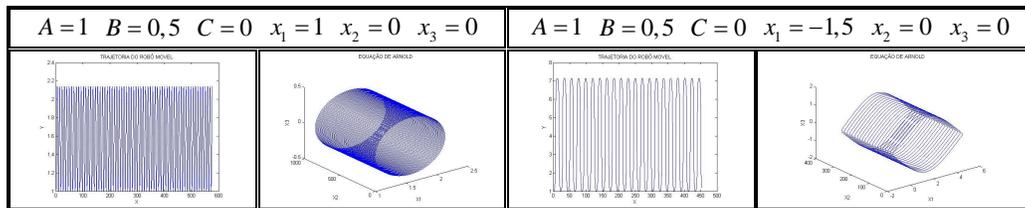
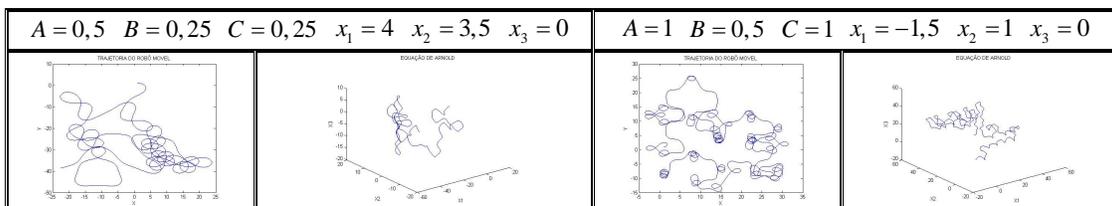


Tabela 6. Comportamento do robô com condições iniciais propostas em uma região de trajetórias fechadas.



4. VISÃO ESTEREO

Para a navegação de robôs móveis é necessário extrair informação do ambiente de modo a fornecer elementos para o robô se locomover de forma segura e atingir seus objetivos (Godoi, 2008). A aquisição de informação é realizada através de sensores. A escolha do sensor mais adequado depende do tipo de tarefa de navegação que se pretende realizar e da autonomia desejada. Diversos são os tipos de sensores que podem ser utilizados (ultrassom, infravermelho, sistema de posicionamento global, lasers, visão computacional, entre outros). Sensores baseados em câmeras são capazes de capturar imagens de forma contínua e fornecer a posição de objetos. Em certas aplicações de visão computacional é interessante ter um campo visual mais abrangente do que o obtido com uma câmera convencional. Imagens panorâmicas contêm informação de todo o ambiente em uma única imagem. Um sistema de visão panorâmica ou omnidirecional fornece uma imagem de 360° do ambiente. Devido a essa característica, visão panorâmica tem se tornado uma ferramenta importante, especialmente na área de robôs móveis. A visão omnidirecional (do latim “omnis”, em português “oni”, significa tudo ou todo) tem sido utilizada em inúmeras aplicações, como: vigilância remota, reconstrução tridimensional de ambientes, rastreamento visual, navegação de robôs móveis, entre outras.

Outro método para obter visão estereo é utilizar um par de imagens de duas ou mais câmeras, para produzir mapas de disparidade que podem ser facilmente transformados em mapas do ambiente. Em um sistema típico de visão estereo, composto por duas câmeras, a disparidade associada a um ponto qualquer em uma imagem pode ser entendida como o deslocamento aparente entre este ponto e o seu homólogo na outra imagem (Figura 6). O ponto crucial nessa técnica de reconstrução é a determinação dos pontos homólogos entre as duas imagens, dado que dessa determinação depende a qualidade e precisão da cena reconstruída.

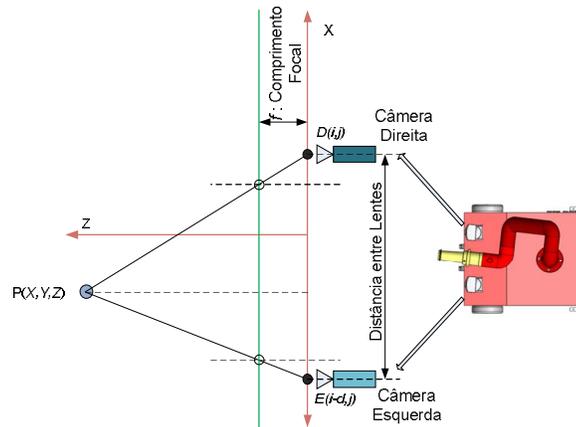


Figura 6. Representação da projeção estereo.

Dadas duas imagens, uma da câmera direita e outra da câmera esquerda para cada disparidade no intervalo de busca, calcula-se a matriz de energia do erro. Neste método é utilizado o bloco de correspondência técnica a fim de construir uma matriz de energia de erros para cada disparidade. Considerando que a imagem da esquerda em formato RGB, como $L(i, j, c)$, e a imagem direita no formato RGB por $R(i, j, c)$ e o erro de energia por $e(i, j, d)$. Para o tamanho de janela $n \times m$ do bloco correspondente, o erro de energia pode ser expresso como $e(i, j, d)$ (Figura 7).

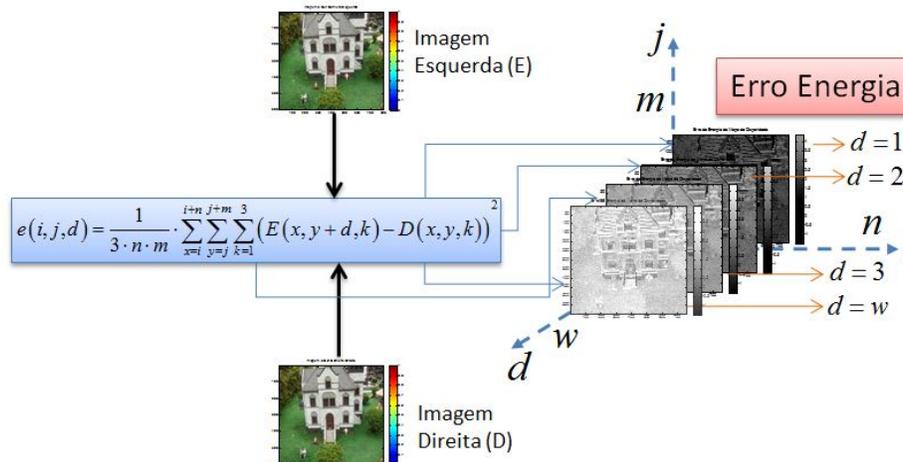


Figura 7. Construção da matriz de erro de energia.

Aplicando o filtro da média iterativa para cada matriz de erro, é calculado para um valor de disparidade no intervalo de busca (Figura 8).

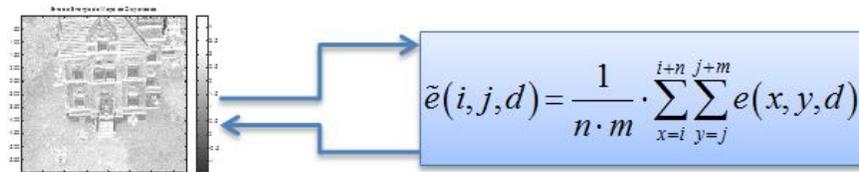


Figura 8. Suavização da matriz de energia para todos os valores de disparidade.

Assim para cada pixel é encontrado o mínimo erro da energia e é atribuído o índice de disparidade (Figura 9). As imagens testadas e os resultados do algoritmo introduzido neste trabalho são apresentados na Figura 10.

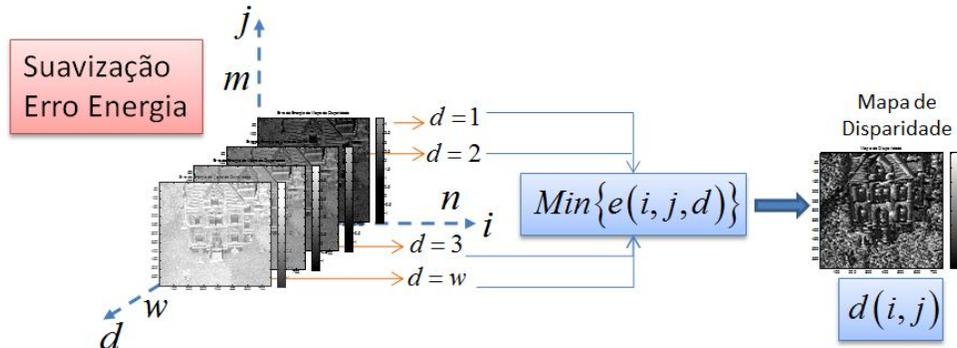


Figura 9. Geração do mapa de disparidade por pontos mínimos de energia.

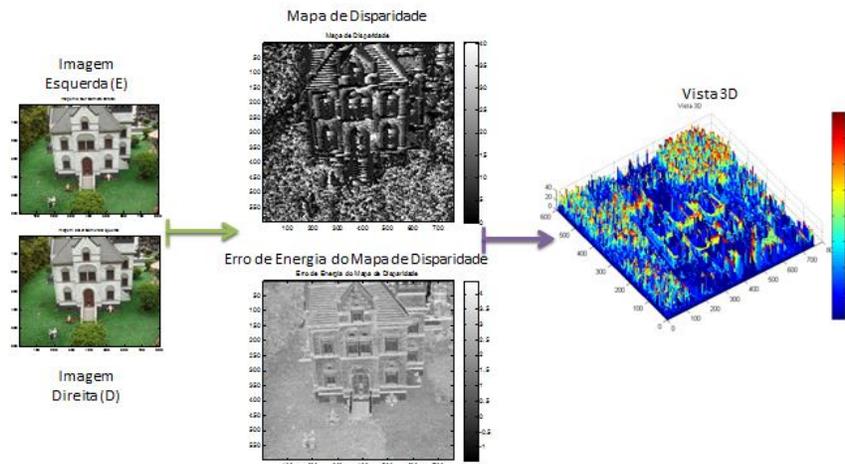


Figura 10. Resultados da minimização da energia de erro global por funções de suavização.

5. CONCLUSÕES

Neste artigo é possível citar a importância da segurança na difícil tarefa de ser bombeiro. O objetivo de desenvolver um robô capaz de se movimentar em um ambiente durante um incêndio ou oferecer um mapa; auxilia na tarefa de resgate de vítimas e na procura de caminhos, com a finalidade de chegar até as vítimas desde um lugar seguro sem colocar em risco a vida do bombeiro. A pesquisa está concentrada em ajudar ao tele operador para que ele perceba o ambiente e prossiga na tomada de decisões, para posteriormente realizar a limpeza e avaliação do desastre.

Para a localização e mapeamento simultâneos de espaços confinados, foi implementado um robô móvel caótico com o objetivo de ajudar no comando do incidente e orientar melhor a libertação dos sobreviventes. Isso implica um robô móvel com um controlador que garante um movimento caótico. A equação de Arnold apresenta um comportamento caótico em um fluido perfeitamente incompressível, adotando a dinâmica caótica para integrar no robô móvel e o comportamento da equação de Arnold, foi analisado. De igual forma foi projetado um controlador caótico onde a dinâmica total do robô móvel é caracterizada pela equação de Arnold. Este tipo de controle caótico poderia

explorar um espaço perigoso, a fim de encontrar fontes de ignição ou fazer um mapa do estado atual do local. Também foi estudada a visão estéreo para auxiliar na hora da reconstrução tridimensional de ambientes ou como opção de rastreamento visual.

6. REFERÊNCIAS

- Ahlgren, D. J., 2001, "Fire-Fighting Robots and First-Year Engineering Design: Trinity College Experience", 31st ASEE/IEEE Frontiers in Education Conference, Session S2E.
- Baltes, J., Anderson, J., 2002, "A Pragmatic Approach to Robot Rescue: The Keystone Fire Brigade", *American Association for Artificial Intelligent Technical Report WS-02-18*.
- Bradshaw, A., 1991, "The UK Security and Fire Fighting Advanced Robot Project", *Advanced Robotic Initiatives in the UK, IEEE Colloquium*, pp. 1/1-1/4.
- Burke, R., 2008, *Fire Protection Systems and Response*. CRC Press Taylor & Francis Group.
- Chien, T. L., Guo, J. H., Su, K. L., et al., 2007, "Develop a Multiple Interface Based Fire Fighting Robot", Proceedings of International Conference on Mechatronics, Kumamoto, Japão.
- Chonnaparamutt, W., Birk, A., 2006, "Using Rescue Robots to Increase Construction Site Safety", ISARC2006, pp. 241-245.
- Correa, F. R., Okamoto, J., 2005, "Grades de Evidência com Visão Omnidirecional Estéreo" *Boletim Técnico da Escola politécnica da USP Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos*.
- Das, A., Kantor, G., Kumar, V., et al., 2003, "Distributed Search and Rescue with robot and Sensor Teams".
- Freeman, W. J., 1994, "Neural Networks and Chaos", *J. Theor. Biol.* 171, pp.13-18.
- Gaspar, J. A., 1994, *Visão para Robótica Móvel: Detecção de Obstáculos sobre Pavimento Plano*. M.Sc. Dissertação, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, Portugal.
- Godoi, P., 2008, *Auto-localização e construção de mapas de ambiente para robôs móveis baseados em visão omnidirecional estéreo*. M.Sc., Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil.
- Jansri, A., Klomkarn, K., Sooraksa, P., 2004, "On Comparison of Attractors for Chaotic Mobile Robots", *The 30th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society Electronics Society*, v. 3, pp. 2536-2541.
- Kajiwara, T., Yamaguchi, J., Kanemoto, J., et al., 1989, "A Security Guard Robot which Patrols using Map Information", *IEEE international workshop on intelligent robots and systems*, Tsukuba, Japão.
- Lengerke, O., Dutra M.S., Franca, F. M.G., Tavera, M.J.M., 2008, "Automated Guided Vehicles (AGV): Searching a Path in the Flexible Manufacturing Systems", *Journal of Konbin*, v. 8, pp. 113-124.
- Lewis, P., Flann, N., Torrie, M., et al., 2005 "Chaos an Intelligent Ultra-Mobile SUGV: Combining the Mobility of Wheels, Tracks and Legs" *Unmanned Ground Vehicle technology VIII. Edited by Gerhart, Grant R; Shoemaker, Charles M.; Douglas W. Proceedings of the SPIE*, v. 5808, pp. 427-438.
- Liljebäck, P., Stavadahl, Ø., Beitnes, A., 2006, "SnakeFighter – Development of a Water Hydraulic Fire Fighting Snake Robot", *IEEE ICARCV*.
- Luo, R., Su, K. L., 2007, "Autonomous Fire-Detection System Using Adaptive Sensory Fusion for Intelligent Security Robot", *IEEE/ASME Transaction on mechatronics*, v. 12, n. 3, pp. 274-281.
- Martínez, J. L., Mandow, A., Morales, J., et al., 2005, "Approximating Kinematics for Tracked Mobile Robots", *The International Journal of Robotics Research*, v. 24, n. 10 (Out), pp. 867-878.
- Martins-Filho, L. S., Figueiredo, R., Rocha, R., 2004, "Commanding Mobile Robots with Chaos", *ABCM Symposium Series in Mechatronics*, v. 1, pp. 40-46.
- Micire, M. J., 2007, "Evolution and Field Performance of a Rescue Robot", *Journal of field robotics*, v. 25, n. 1, pp. 17-30.
- Murphy, R., 2004, "Activities of the Rescue Robots at the World Trade Center from 11-21 September 2001", *IEEE Robotics & Automation Magazine*, pp. 50-61.
- Nakamura, Y., Sekiguchi, A., 2001, "The Chaotic Mobile Robot", *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, v.17, n.6, pp. 898-904.
- Nist, 2002, *FIRE.GOV Better Fire Fighting through Research*, Primavera 2002.
- Quintiere, J. G., 2006, *Fundamentals of Fire Phenomena*, Jhon Wiley and Sons.
- Ruuth, S., Maros, I., Nieminen, K., 2007, *A Multiobjective Dynamic Nonlinear Robot Assignment Problem*. In: Report ISSN 1469-4174, Imperial College, Department of Computing Technical Report 2007/3.
- Savi, M., 2006, *Dinâmica Não-Linear e Caos*. Rio de Janeiro, e-papers
- Setiawan, J. D., Subchan, M., Budiyo, A., 2007, "Virtual Reality Simulation of Fire Fighting Robot Dynamic and Motion". In: ICIUS 2007, pp. 57-63, Bali, Indonesia, Oct 24-25.
- Shimosasa, Y., Kanemoto, J., Hakamada, K., et al., 1999, "Security Service System using Autonomous Mobile Robot", *IEEE*, pp. 825-829.
- Su, K. L., 2006, "Automatic Fire Detection System Using Adaptive Fusion Algorithm for Fire Fighting Robot", *IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, Taipei, Taiwan.
- Tadokoro, S., 2005, "Special Project on Development of Advanced Robots for Disaster Response (DDT Project)", *IEEE Workshop on Advanced Robotics and Its Social Impacts*, pp. 66-72.
- Zhuang, F., Zupan, C., Chao, Z., et al., 2008, "A Cable-Tunnel Inspecting Robot for Dangerous Environment", *International Journal of Advanced Robotic Systems*, v. 5, n. 3, pp.243-248.