

# MAPEAMENTO E LOCALIZAÇÃO SIMULTÂNEOS BASEADOS EM COMBINAÇÕES DE LEITURAS POLARES

ANDERSON ANJOS DA SILVA\*, CARLOS H. C. RIBEIRO\*

\**NCROMA Grupo de Pesquisa*

*Divisão de Engenharia Eletrônica, Ciência da Computação*

*Instituto Tecnológico de Aeronáutica, ITA-IEE-IEES*

*Pça. Mal. Eduardo Gomes 50, Vila das Acácias 12228-900*

*São José dos Campos, SP, Brasil*

Emails: [anhos@ita.br](mailto:anhos@ita.br), [carlos@ita.br](mailto:carlos@ita.br)

**Abstract**— This paper presents a method for matching measurements from a 2D laser scanner. It uses an approximation of the point to point combination, where a search is performed in order to associate these points through simple matching. The information used is provided by a laser scanner that performs measurements in a simulated environment called Gazebo/Player. To demonstrate the viability of this technique, experimental results are presented, where a Extended Kalman Filter was implemented to solve the SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) problem.

**Keywords**— Scan Matching, SLAM, Mobile Robot.

**Resumo**— Este artigo apresenta um método para combinação das leituras de um scanner laser 2D que utiliza a aproximação da combinação ponto-a-ponto, onde é executada uma busca para associação dos pontos por combinação simples. As informações que alimentam o algoritmo provêm de um scanner laser, que realiza medidas em um ambiente de simulação denominado Gazebo/Player. Para demonstração prática de uso, resultados experimentais são apresentados, com uma implementação do Filtro de Kalman Estendido para solucionar o problema de SLAM (*Simultaneous Localization and Mapping*).

**Keywords**— Combinação de Leituras, SLAM, Robótica Móvel.

## 1 Introdução

O desenvolvimento de técnicas para navegação de robôs móveis autônomos em ambientes não estruturados é um dos maiores desafios da pesquisa na área de Robótica. De fato, a navegação na Robótica Móvel requer a utilização de métodos eficientes para as tarefas de localização e mapeamento, e várias abordagens têm sido propostas na literatura, como por exemplo (Simultaneous Localisation And Mapping — SLAM), descrito em (Gamini Dissanayake and Bailey, 2000).

Muitos dos algoritmos encontrados na literatura utilizados para localização, mapeamento e SLAM possuem uma característica em comum: são probabilísticos. Estes algoritmos empregam equações com perturbações para modelar as incertezas que ocorrem na interação entre o robô e o ambiente. Neste trabalho será apresentada uma aproximação clássica para solucionar o problema de SLAM, baseada no Filtro de Kalman Estendido (Gamini Dissanayake and Bailey, 2000), atuando sobre combinações das medidas de distância entre o robô e os obstáculos, sendo estas medidas provenientes de leituras de scanner laser. Ao efetuar a combinação com a leitura do laser, a pose da leitura corrente é relacionada com a respectiva referência do laser, ajustando-se esta pose de leitura até que a melhor sobreposição com a referência seja alcançada. Na Seção 2.3 maiores detalhes a respeito são

apresentados.

A combinação das leituras sensoriais pode ser dividida em dois tipos: local (Lu and Milios, 1997) ou global (Tomono, 2004). Neste trabalho, no processo de combinação das leituras, serão utilizadas as informações geradas pelos mapas locais. A combinação de leituras do laser, por sua vez, pode ser categorizada pelo método de associação utilizado: *feature to feature*, *point to point* e *point to feature*. No método *feature to feature* as informações são representadas por segmentos de linha (Gutmann, 2000), ou cantos (Lingemann et al., 2004), que são extraídas das leituras do scanner laser e então combinadas. Em combinações *point to feature*, como em (Cox, 1991), os pontos de uma leitura são combinados com as características na forma de linhas que podem ser partes de um mapa pré-definido. Detalhes sobre a extração destas características podem ser encontradas em (Biber and Straber, 2003). Finalmente, a combinação *point to point* é o foco deste trabalho, e não requer que o ambiente seja estruturado ou que contenha características pré-definidas.

Alguns dos métodos conhecidos e utilizados para combinação *point to point* são os seguintes: *Iterative Closest Point* (ICP) proposto por (Besl and McKay, 1992), *Iterative Matching Range Point* (IMRP) proposto por (Lu and Milios, 1997), *Iterative Dual Correspondence* (IDC) proposto por (Lu and Milios, 1997) e o método utilizado neste artigo, denominado Combinação de Leituras

Polares, proposto por (Diosi and Kleeman, 2005). Todos os 3 primeiros métodos apresentados operam em um plano de coordenadas cartesianas, e portanto não possuem a vantagem do sistema de coordenadas polares, que é nativo em leituras de um scanner laser.

Há outros métodos de combinação de leituras, como o de (Weiss and von Puttkamer, 1995). Neste caso, tanto para a leitura de referência quanto para a leitura corrente, é gerado um histograma de ângulo da orientação dos segmentos de linhas conectando os pontos consecutivos. A orientação da leitura corrente relativa à respectiva leitura de referência é obtida encontrando a fase que possui a correlação cruzada máxima dos dois histogramas do ângulo. A translação é encontrada similarmente pelo cálculo dos histogramas de  $x$  e  $y$  e calculando-se a correlação cruzada.

Este trabalho propõe a implementação das combinações das leituras do scanner laser baseado no método de (Diosi and Kleeman, 2005). O resultado obtido através do algoritmo de combinação de leituras será introduzido no algoritmo do Filtro de Kalman para geração do SLAM. Estes métodos serão testados e validados no simulador Player/Gazebo.

## 2 Pré-processamento de Leituras

O pré-processamento das leituras do scanner laser é um requisito para a combinação destas leituras. Esta etapa auxilia a remoção de medidas com erros e ruídos, possibilitando maior precisão e robustez nas combinações. De fato, as leituras podem conter pontos que não são adequados para a combinação, tais como:

- Pontos que representam um objeto em movimento, como uma pessoa caminhando, as pernas de uma cadeira ou mesa, que ao longo do tempo possivelmente não serão estáticos no ambiente.
- Leituras descontínuas do laser que geram medidas em espaços entre dois objetos.
- Medidas que ultrapassam o alcance máximo do laser. Algumas leituras poderão retornar medidas inconsistentes, quando não há um objeto dentro do limite de visibilidade das leituras do laser.

As subseções a seguir descrevem as etapas principais de pré-processamento.

### 2.1 Aplicação de Filtro Mediano

Filtros Medianos são utilizados para eliminar algumas discrepâncias nas medidas. Com a aplicação do filtro mediano às leituras do laser, alguns objetos detectados, como as pernas de uma cadeira ou de uma mesa, provavelmente

aparecerão com um perfil suavizado nas medidas como um todo. Esta técnica é baseada no seguinte procedimento: para cada vizinhança das medidas, ordena os valores em ordem crescente e escolhe como saída o valor mediano, ou seja, aquele que se encontra no centro da seqüência.

### 2.2 Segmentação

Segundo (Diosi and Kleeman, 2005), a segmentação das medidas obtidas pelo laser tem duas vantagens. A primeira é evitar que haja uma interpolação entre dois objetos cujo conhecimento a priori indica que separação física. A segunda vantagem é que se as leituras do laser são segmentadas, os segmentos poderão ser rastreados em leituras consecutivas, possibilitando a detecção de um objeto em movimento.

### 2.3 Determinação da Posição da Leitura Corrente no Sistema de Coordenadas de Referência

Para implementar uma combinação das leituras, é necessário encontrar a posição e orientação do sistema de coordenadas da leitura corrente em relação ao respectivo sistema de coordenadas da leitura de referência. Para isto, utiliza-se a seguinte transformação:

$$T_1 T_L T_3 = T_2 T_L \quad (1)$$

onde  $T_1$  é a matriz homogênea de transformação do sistema de coordenadas de referência do robô para o sistema de coordenadas do mundo,  $T_2$  é a transformação do sistema de coordenadas corrente para o sistema do mundo,  $T_3$  é a transformação do sistema de coordenadas das leituras do laser para o sistema de referência do laser e  $T_L$  é a transformação do sistema do laser para o sistema do robô. Através de 1, a transformação corrente para a referência é dada por:

$$T_3 = T_L^{-1} T_1^{-1} T_2 T_L. \quad (2)$$

Se  $(x_{rr}, y_{rr}, \theta_{rr})$  descreve a pose do robô na localização de referência, mas no sistema de coordenadas do mundo,  $(x_{cr}, y_{cr}, \theta_{cr})$  descreve a pose do robô na localização corrente do sistema de coordenadas do mundo e  $(x_c, y_c, \theta_c)$  descreve a pose do scanner laser na localização corrente expressa no sistema de coordenadas de referência, e se a pose do scanner laser é descrita por  $(x_l, y_l, \theta_l)$  no sistema de coordenadas do robô, então:

$$\begin{aligned}
T_3 &= \begin{bmatrix} \cos \theta_c & -\sin \theta_c & x_c \\ \sin \theta_c & \cos \theta_c & y_c \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
T_1 &= \begin{bmatrix} \cos \theta_{rr} & -\sin \theta_{rr} & x_{rr} \\ \sin \theta_{rr} & \cos \theta_{rr} & y_{rr} \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
T_L &= \begin{bmatrix} \cos \theta_l & -\sin \theta_l & x_l \\ \sin \theta_l & \cos \theta_l & y_l \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
T_2 &= \begin{bmatrix} \cos \theta_{cr} & -\sin \theta_{cr} & x_{cr} \\ \sin \theta_{cr} & \cos \theta_{cr} & y_{cr} \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}
\end{aligned} \tag{3}$$

### 3 Combinação das Leituras

O método de combinação das leituras do laser descreve o próximo alinhamento da leitura corrente com a respectiva leitura de referência. Assume-se que a posição inicial da leitura corrente é dada e representada no sistema de coordenadas da leitura de referência. O sistema de coordenadas da leitura do laser é centrado no ponto de rotação do espelho do scanner laser, e o ângulo zero do sistema de coordenadas cartesianas do laser coincide com a direção da primeira leitura informada. A leitura corrente é descrita como  $C = (x_c, y_c, \theta_c, \{r_{ci}, \phi_{ri}\}_{i=1}^n)$ , onde  $x_c, y_c, \theta_c$  descrevem a posição e orientação, e  $\{r_{ci}, \phi_{ri}\}_{i=1}^n$  descreve as  $n$  medidas de  $r_{ci}$  nos ângulos  $\phi_{ri}$ , representadas no sistema de coordenadas corrente. As medidas  $\{r_{ci}, \phi_{ri}\}_{i=1}^n$  são ordenadas por ângulos crescentes, de acordo com a seqüência que está sendo lida pelo scanner laser. A referência da leitura é descrita como  $R = \{r_{ri}, \phi_{ri}\}_{i=1}^n$ . A combinação das leituras é executada da seguinte maneira: após pré-processar as leituras, a projeção da leitura é seguida pela estimação da translação ou pela estimação da orientação.

#### 3.1 Projeção das Leituras

Para determinação das referências das leituras, são apresentadas as seguintes equações:

$$r'_{ci} = \sqrt{(r_{ci} \cos(\theta_c + \phi_{ci}) + x_c)^2 + (r_{ci} \sin(\theta_c + \phi_{ci}) + y_c)^2} \tag{4}$$

$$\phi'_{ci} = \arctg(r_{ci} \sin(\theta_c + \phi_{ci}) + y_c, r_{ci} \cos(\theta_c + \phi_{ci}) + x_c) \tag{5}$$

O objetivo deste processo é estimar qual será a medida fornecida pelo scanner laser na postura de referência. Este passo consiste em identificar  $(r'_{ci}, \phi'_{ci})$  para cada segmento entre duas medidas, além de tentar determinar se há uma ou mais amostras entre estas duas medidas consecutivas.

Para cada ângulo medido através do scanner laser são calculados os seus valores de alcance por interpolação linear. Ao efetuar a interpolação é possível que o valor do alcance calculado

seja menor que um valor já determinado anteriormente, então este é sobrescrito com esta nova informação.

#### 3.2 Estimação da Translação

Após a projeção das leituras, para cada ângulo do scanner laser  $\phi_{ri}$  existe um correspondente para a projeção da leitura corrente identificado por  $r'_{ci}$  e um  $r_{ri}$  que corresponde à leitura de referência. O objetivo principal é encontrar  $(x_c, y_c)$  minimizando  $\sum w_i (r_{ri} - r'_{ci})^2$ , onde  $w_i$  é o peso utilizado para reduzir a influência de combinações ruins. De acordo com (Diosi and Kleeman, 2005), para minimizar os pesos da soma do quadrado dos residuais, uma regressão linear é aplicada de acordo com a equação 4.

$$\Delta r_i \approx \frac{\delta r'_{ci}}{\delta x_c} \Delta x_c + \frac{\delta r'_{ci}}{\delta y_c} \Delta y_c = \cos(\phi_{ri}) \Delta x_c + \sin(\phi_{ri}) \Delta y_c \tag{6}$$

$\frac{\delta r'_{ci}}{\delta x_c} = \cos(\phi_{ri})$  derivada de 4 como segue:

$$\begin{aligned}
\frac{\delta r'_{ci}}{\delta x_c} &= \frac{1}{2} \frac{2(r_{cj} \cos(\theta_c + \phi_{cj}) + x_c)}{\sqrt{(r_{cj} \cos(\theta_c + \phi_{cj}) + x_c)^2 + (r_{cj} \sin(\theta_c + \phi_{cj}) + y_c)^2}} \\
&= \frac{(r_{cj} \cos(\theta_c + \phi_{cj}) + x_c)}{r'_{ci}} = \frac{r'_{ci} \cos \phi_{ri}}{r'_{ci}} = \cos \phi_{ri}
\end{aligned} \tag{7}$$

Se há diferença entre o alcance projetado corrente e o de referência, esta poderá ser modelada como

$$(r'_c - r_r) = H \begin{bmatrix} \Delta x_c \\ \Delta y_c \end{bmatrix} + v \tag{8}$$

onde  $v$  é vetor de ruído e

$$H = \begin{bmatrix} \frac{\delta r'_{c1}}{\delta x_c} & \frac{\delta r'_{c1}}{\delta y_c} \\ \frac{\delta r'_{c2}}{\delta x_c} & \frac{\delta r'_{c2}}{\delta y_c} \\ \dots & \dots \end{bmatrix} \tag{9}$$

Desta forma a correção da posição  $(\Delta x_c, \Delta y_c)$  da leitura corrente é calculada pela minimização da soma dos pesos dos alcances residuais  $\sum w_i (r_{ri} - r'_{ci})^2$ , usando-se a equação dos mínimos quadrados:

$$\begin{bmatrix} \Delta x_c \\ \Delta y_c \end{bmatrix} = (H^T W H)^{-1} H^T W (r'_c - r_r) \tag{10}$$

onde  $r'_c, r_r$  são os vetores que contém  $r'_{ci}$  e  $r_{ri}$ , e  $W$  é uma matriz diagonal de pesos. Os elementos de  $W$  são calculados de acordo com as recomendações de (Diosi and Kleeman, 2005):

$$w_i = 1 - \frac{d_i^m}{d_i^m + c^m} \tag{11}$$

onde  $d_i = r''_{ci} - r_{ri}$  é o erro projetado entre a medida da leitura corrente e a medida da leitura de referência, e  $c$  é uma constante.

Há duas razões para que a combinação das leituras polares efetue a estimação de translação e orientação separadamente. Primeiramente, se a derivada parcial  $\frac{\delta r''_{ci}}{\delta \theta_c} = y_c \cos \phi_{ri} - x_c \sin \phi_{ri}$  é anexada à matriz  $\hat{H}$ , na Equação 9 a matriz  $H^TWH$  poderá ser difícil de ser condicionada e o processo de estimação poderá divergir. A causa da dificuldade de condicionamento provém da estrutura de  $H$ ,

$$H = \begin{bmatrix} \vdots & \vdots & \vdots \\ \cos \phi_{ri} & \sin \phi_{ri} & y_c \cos \phi_{ri} - x_c \sin \phi_{ri} \\ \vdots & \vdots & \vdots \end{bmatrix} \quad (12)$$

onde duas colunas contém números pequenos no intervalo de  $(-1,1)$  e a terceira coluna contém números grandes que dependem dos valores de  $x_c$  e  $y_c$ . A segunda razão é que o processo se torna mais eficiente estimando-se a orientação da forma descrita na seção 3.3.

### 3.3 Estimação da Orientação

A mudança de orientação das leituras correntes é representada no sistema de coordenadas polares por um deslocamento dos alcances medidos pelo scanner laser para a esquerda ou direita. Assumindo que a localização correta da leitura corrente é conhecida, e que as leituras correntes e de referência contém as medidas de alguns objetos estáticos, a orientação correta da leitura corrente pode ser encontrada através da projeção  $(r''_{ci}, \phi_{ri})$  desta leitura, até que esta sobreponha toda a leitura de referência. A correção da orientação é estimada pelo ajuste de uma parábola para os três pontos de fechamento  $(-1, 0, +1)$ , de modo que se obtenha os menores erros absolutos da média e calculando-se a abscissa do mínimo.

O cálculo da abscissa do mínimo é executado como segue: Assume-se que os 3 pontos da função de erro são  $(-1, e_{-1})$ ,  $(0, e_0)$  e  $(+1, e_{+1})$ . Desta forma a abscissa  $m$  do mínimo  $e_m$  da parábola é descrita como  $e = at^2 + bt + c$ . Dada a equação da parábola, a abscissa do mínimo pode ser encontrada como

$$\frac{\delta e}{\delta t} = 0 = 2am + b = 0 \Rightarrow m = -\frac{b}{2a} \quad (13)$$

Para encontrar  $a$  e  $b$  substitui-se os 3 pontos conhecidos na equação da parábola:

$$a - b + c = e_{-1} \quad (14)$$

$$c = e_0 \quad (15)$$

$$a + b + c = e_{+1} \quad (16)$$

Então a abscissa do mínimo é:

$$m = -\frac{b}{2a} = -\frac{\frac{e_{+1}-e_{-1}}{2}}{\frac{e_{-1}+e_{+1}-2e_0}{2}} = \frac{e_{+1}-e_{-1}}{2(e_0-e_{-1}-e_{+1})} \quad (17)$$

## 4 SLAM Utilizando Combinação de Leituras Polares

A solução do SLAM foi desenvolvida através da utilização do Filtro de Kalman, conforme descrito em (Davison, 1998).

Como em (Bosse et al., 2004), as medidas fornecidas pelo scanner laser são utilizadas como pontos de referência. Em cada instante de tempo o robô obtém uma nova posição devido ao seu deslocamento, e então um novo ponto é criado. Neste deslocamento o robô pode se deslocar em direção a um obstáculo, tão próximo, assumindo que o robô aproximou-se de um obstáculo. Neste instante, é executado a atualização das medidas anteriores. É importante perceber que não há uma combinação consecutiva das leituras, porque assume-se que quando o deslocamento dado pela odometria do robô é pequeno, esta leitura é mais precisa que a própria combinação das leituras.

Quando se atualiza um ponto de referência, a observação é obtida pela combinação da leitura, como mostra a Figura 1. A medida do laser é passada para o algoritmo de combinação das leituras como a leitura de referência, ou seja, a medida adquirida no instante de tempo da aquisição, e a leitura armazenada é passada como leitura corrente. O resultado desta combinação é a posição do ponto de referência expressa no sistema de coordenadas do laser para a posição corrente do robô.



Figura 1: Fluxograma do Algoritmo.

De acordo com (Davison, 1998),

$$x_{new} = \begin{bmatrix} x_v \\ y_1 \\ \vdots \\ y_i \end{bmatrix} \quad (18)$$

$$P_{new} = \begin{bmatrix} P_{xx} & P_{xy1} & \cdots & P_{xx} \frac{\delta y_1}{\delta x_v} T \\ P_{y_1x} & P_{y_1y_1} & \cdots & P_{y_1x} \frac{\delta y_1}{\delta x_v} T \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ P_{y_{i-1}x} & P_{y_{i-1}y_1} & \cdots & P_{y_{i-1}x} \frac{\delta y_1}{\delta x_v} T \\ \frac{\delta y_i}{\delta x_v} P_{xx} & \frac{\delta y_i}{\delta x_v} P_{xy1} & \cdots & \frac{\delta y_i}{\delta x_v} P_{xx} \frac{\delta y_i}{\delta x_v} T + \\ & & & \frac{\delta y_i}{\delta h} R \frac{\delta y_i}{\delta h} T \end{bmatrix} \quad (19)$$

onde  $x_v$  é a posição do robô,  $y_n = [x_n, y_n, \theta_n]$  é a localização do ponto de referência,  $y_i$  é o novo ponto de referência no sistema de coordenadas do mundo,  $h$  é a medida do novo ponto de referência expressa no sistema de coordenadas do robô e  $R$  é a covariância estimada de  $h$ . Se a medida  $h$  corresponde à um novo ponto de referência  $y_i$ , e se a pose do laser no robô móvel for precisa e conhecida, então a medida de covariância do ruído  $R$  é uma matriz nula. A transformação das medidas para o sistema de coordenadas do mundo é dada por:

$$x_i = x_v - y_L \sin(\theta_v) \quad (20)$$

$$y_i = y_v + y_L \cos(\theta_v) \quad (21)$$

$$\theta_i = \theta_v \quad (22)$$

onde é assumido que o scanner laser no eixo X é paralelo ao robô no eixo X e que está instalado no centro do robô  $(0, y_L)$ . A matriz Jacobiana  $\frac{\delta y_i}{\delta x_v}$  é dada por:

$$\frac{\delta y_i}{\delta x_v} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -\cos(\theta_v)x_L \\ 0 & 1 & -\sin(\theta_v)y_L \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (23)$$

A predição  $h_i = [x_{hi}, y_{hi}, \theta_i]^T$  do  $i$ -ésimo ponto de referência, deverá ser calculada como segue:

$$x_{hi} = (x_i - x_v) \cos(\theta_v) + (y_i - y_v) \sin(\theta_v) \quad (24)$$

$$y_{hi} = -(x_i - x_v) \sin(\theta_v) + (y_i - y_v) \cos(\theta_v) - y_L \quad (25)$$

$$\theta_{hi} = \theta_i - \theta_v \quad (26)$$

## 5 Resultados Experimentais

A execução dos experimentos para validação dos algoritmos foi efetuada na plataforma de simulação Gazebo/Player conforme (Gerkey et al., 2004), como mostra o ambiente na Figura 2. Nesta plataforma foi simulado um robô Pioneer2DX, com sonares, odômetro e um scanner laser percorrendo um ambiente com algumas reentrâncias.

Como descrito em (Bosse et al., 2004), a pose do robô é utilizada como ponto de referência. Com este ponto são associadas e armazenadas as leituras do scanner laser. A cada instante

de tempo o robô encontra uma quina referente ao obstáculo e executa uma nova leitura do scanner realizando, com estas novas informações, a combinação com as leituras anteriores, e com estes dados criando os novos pontos de referência. Quando estes pontos são atualizados, a observação é obtida pela combinação das leituras, sendo as medidas do laser passadas como referência.

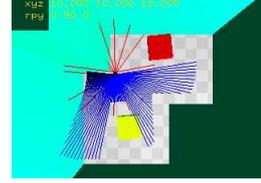


Figura 2: Ambiente simulado no Gazebo/Player.

Conforme (Arleo et al., 1999), o sistema de navegação do robô parte de uma posição inicial, deslocando-se até encontrar um obstáculo. Com a informação de que está próximo ao obstáculo, o robô circunda-o, executando a combinação das leituras do laser a cada quina encontrada. Com estas combinações assume-se que há novos pontos de referência para a observação do algoritmo de SLAM, de acordo com a Figura 1.

Como demonstração de resultados do algoritmo de combinação de leituras, é apresentada na Figura 3 a combinação das leituras extraídas no instante em que o robô parte da posição inicial e gira 90 graus ao encontrar um obstáculo.

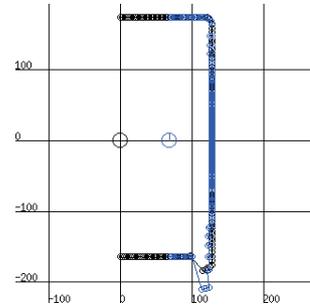


Figura 3: Resultado da combinação das leituras.

A Figura 4 exibe a evolução dos erros de combinações das leituras possibilitando a visualização da convergência dos pontos de referência, adquiridos pelo laser. É importante salientar que estas leituras executadas pelo robô foram adquiridas em pontos diferentes, com variações de translação e rotação.

O resultado obtido pelo Filtro de Kalman em SLAM é apresentado na Figura 5. Se comparado com o ambiente simulado, exibe qualidade satisfatória nas informações apresentadas. O ambiente simulado no Gazebo, com dimensões aproximadas de 14mx12m, é formado por obstáculos e esquinas. O robô é equipado com

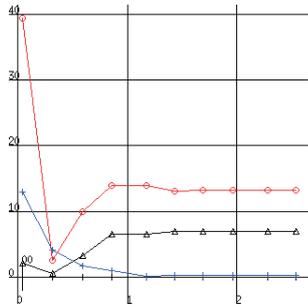


Figura 4: Evolução dos erros  $x$  (círculos),  $y$  (triângulos) e orientação (cruz), representados em [cm] e  $[\circ]$ , respectivamente.

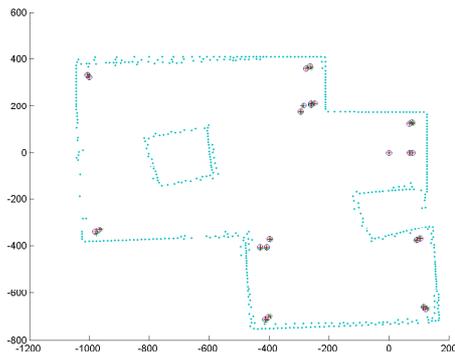


Figura 5: Resultado do SLAM.

um scanner, um conjunto de sonares e odômetro, e circunda o ambiente seguindo como referência suas paredes.

## 6 Conclusões e Trabalhos Futuros

Este trabalho demonstra a possibilidade de efetuar a combinação das medidas de coordenadas polares, nativas de um sistema de aquisição via scanner laser. Foi apresentado um algoritmo de combinação *point to point* das informações. A vantagem deste método é que o scanner laser respeita a estrutura de coordenadas polares, resultando em um algoritmo de combinação com bom desempenho.

Os resultados dos experimentos de combinações das leituras polares foram satisfatórios. Para avaliação, pode-se considerar os testes executados com o Filtro de Kalman para solucionar o problema de SLAM utilizando-se como entrada do algoritmo as informações providas pelas combinações das leituras.

O algoritmo SLAM reproduziu um mapa do ambiente condizente com o esperado, comparado ao mundo criado no simulador Gazebo. O objetivo da pesquisa e os experimentos relatados envolvendo combinações das leituras sensoriais em SLAM motiva trabalhos futuros, como por exemplo a implementação em ambientes com vários robôs. Nesta proposta, as informações dos mapas locais adquiridos por cada robô deverão

ser combinadas entre os robôs da equipe. Os resultados destas combinações poderão então gerar um mapa global, através do algoritmo de SLAM.

## 7 Agradecimentos

À CAPES, pelo suporte financeiro.

## Referências

- Arleo, A., del R. Millán, J. and Floreano, D. (1999). Efficient learning of variable-resolution cognitive maps for autonomous indoor navigation, *IEEE Transactions on Robotics and Automation* **15**(6): 991–1000.
- Besl, P. J. and McKay, N. D. (1992). A method for registration of 3-d shapes, *IEEE Trans. Pat. Anal. and Mach. Intelligence* **2**(14): 239–256.
- Biber, P. and Straber, W. (2003). The normal distributions transform: A new approach to laser scan matching, *IEEE* **3**: 2743–2748.
- Bosse, M., Newman, P., Leonard, J. and Teller, S. (2004). Simultaneous localization and map building in large-scale cyclic environments using the atlas framework, *The International Journal of Robotics Research* pp. 1113–1139.
- Cox, I. J. (1991). Blanche - an experiment in guidance and navigation of an autonomous robot vehicle, *IEEE Transactions on Robotics and Automation* **7**(2): 193–204.
- Davison, A. J. (1998). *Mobile Robot Navigation Using Active Vision*, PhD thesis, University of Oxford.
- Diosi, A. and Kleeman, L. (2005). Laser scan matching in polar coordinates with application to slam.
- Gamini Dissanayake, H. D.-W. and Bailey, T. (2000). A computationally efficient solution to the simultaneous localisation and map building (slam) problem, *International Conference on robotics and automation*.
- Gerkey, B., Howard, A., Vaughan, R., Koenig, N. and Howard, A. (2004). Player/stage project. Disponível em: <<http://playerstage.sourceforge.net/>>. Acesso em: Abril 2006.
- Gutmann, J.-S. (2000). *Robuste Navigation Autonomer Mobile Systeme*, PhD thesis, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg.
- Lingemann, K., Surmann, H., Nüchter, A. and Hertzberg, J. (2004). Indoor and outdoor localization for fast mobile robots, *IEEE* **3**: 2185–2190.
- Lu, F. and Milios, E. (1997). Robot pose estimation in unknown environments by matching 2d range scans.
- Tomono, M. (2004). A scan matching method using euclidean invariant signature for global localization and map building., *Proceedings of the 2004 IEEE* pp. 866–871.
- Weiss, G. and von Puttkamer, E. (1995). A map based on laser scans without geometric interpretation.