

EXTRAÇÃO DE LINHAS APLICADA A MAPEAMENTO 2-D DE AMBIENTES TIPO “INDOOR” VIA USO DE SENSOR LASER EMBARCADO EM ROBÔ MÓVEL

Marlus Ribeiro de Souza

PUC Minas – IPUC – Engenharia Mecatrônica, Av. Dom José Gaspar, 500 – Belo Horizonte – MG, 30535-610, taiolomar@bol.com.br

Marcelo Becker

PUC Minas – IPUC – Engenharia Mecatrônica - GEAR, Av. Dom José Gaspar, 500 – Belo Horizonte – MG, 30535-610, marcelo.becker@pucminas.br

Denílson Laudares Rodrigues

PUC Minas – IPUC – Engenharia Mecatrônica - GEAR, Av. Dom José Gaspar, 500 – Belo Horizonte – MG, 30535-610, denilsonlr@pucminas.br

Resumo. Este trabalho mostra a primeira parte da implementação de procedimentos para mapeamento de ambientes tipo “indoor” através do uso de sensor laser SICK LMS 200 embarcado em um robô móvel. A técnica de extração de linhas a partir dos dados do sensor laser consegue reduzir drasticamente o volume de dados a serem processados durante a fase de mapeamento. Para sua implementação, considerou-se que o ambiente a ser mapeado poderia ser suficientemente bem representado por um mapa 2-D. Os resultados obtidos foram promissores e mostram a viabilidade deste procedimento.

Palavras-chave: Sensor Laser, Robótica Móvel, Mapeamento.

1. INTRODUÇÃO

Atualmente verifica-se um grande aumento no número pesquisas em robótica focando aplicações onde o planejamento e a execução de movimentos autônomos são necessários, i.e., o robô deve executar tarefas sem a interferência humana. Tal habilidade é essencial tanto em aplicações em ambientes hostis (p.e.: exploração espacial, ambientes contaminados, exploração oceânica e de petróleo a grandes profundidades, etc.), como também no campo de robôs de serviço que atuam em ambientes mais próximos ao ser humano, ajudando-o em tarefas como manuseio de lixo, tarefas de limpeza, movimentação de cargas, auxilio a mobilidade de portadores de deficiências, etc.

Para se obter um grau mínimo de autonomia, deve-se levar em conta que o ambiente no qual o robô irá operar pode ser extremamente dinâmico, ou seja, sujeito a alterações nas posições de objetos que o compõem. Torna-se então necessário fornecer ao robô informações a respeito da área circunvizinha a ele. Isso é feito através do emprego de sensores que monitoram constantemente o ambiente e o robô (p.e.: sinais de odometria, sensores infravermelho, ultra-som, laser, visão, etc.), em inglês, *sensing*. Em geral o emprego de apenas um desses tipos de sensores não é suficiente para extrair todas as informações necessárias para que o robô possa se movimentar com segurança. Isso se deve às limitações inerentes a cada tipo de sensor. Por exemplo, um sensor laser é incapaz de detectar uma porta de vidro transparente, mas um sensor de ultra-som, pode detectá-la sem maiores

problemas; um outro exemplo é o emprego exclusivo de odometria para monitorar o deslocamento de um robô móvel, após alguns metros de deslocamento, observa-se que a distribuição de incerteza quanto ao posicionamento do robô cresce tomando uma forma característica conhecida por “distribuição tipo banana” (Fig. 1).

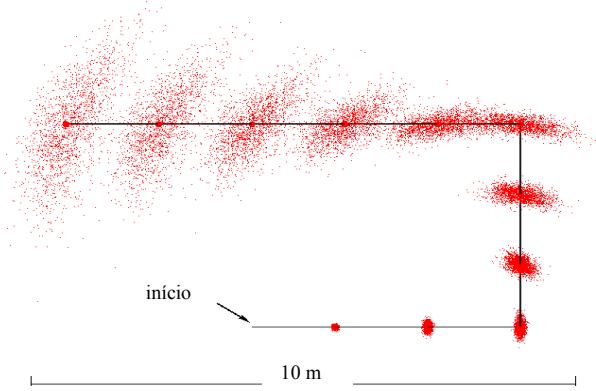


Figura 1. Exemplo típico de limitação de sensor devido aos erros inerentes: emprego exclusivo de odometria no deslocamento de um robô móvel (Thrun, 2004.).

Por isso, muitas vezes empregam-se vários sensores ao mesmo tempo, na tentativa de que a combinação das informações obtidas por cada um possa reduzir as limitações inerentes a eles e, consequentemente, os erros de interpretação do ambiente. Esse procedimento é conhecido por fusão sensorial (Castellanos *et al.*, 2001). Tendo sido obtidas as informações a respeito do ambiente no qual o robô irá executar suas tarefas, é necessário então processar todas elas e gerar os comandos apropriados, ou seja, tomar decisões baseadas no quadro que se apresenta, em inglês, *reasoning*. Isso é realizado por um algoritmo cujos sinais de entrada são os dados dos sensores e a tarefa a ser executada. Baseado nessas informações, o algoritmo deve tomar todas as decisões autonomamente para executar a tarefa. Em aplicações de robótica móvel, o algoritmo deve ser capaz de lidar com as seguintes questões: “*Onde o robô está? Onde ele deve ir? Como chegar lá?*” (Leonard e Durrant-Whyte, 1992). Percebe-se que as duas primeiras questões estão relacionadas ao problema de localização do robô em um ambiente, enquanto que a terceira, ao problema de navegação. Para tentar resolver o problema de localização do robô móvel foram desenvolvidas muitas técnicas, entre as quais, o uso de marcas de referência no ambiente (*landmarks*) que auxiliam o robô a se autolocalizar, reduzindo os erros de posicionamento e o uso de mapas, construídos ou não pelo próprio robô (Castellanos *et al.*, 2001; Dissanayake, *et al.*, 2001, entre outros).

No caso específico de robôs móveis autônomos, muitos pesquisadores têm-se dedicado à solução do problema de localização e mapeamento simultâneos em ambientes desconhecidos (SLAM – *Simultaneous Localization and Map Building Problem*). A possibilidade de se colocar um robô móvel em uma posição desconhecida em um ambiente desconhecido e se obter um mapa, para navegação nesse ambiente, mapa esse produzido pelo próprio robô a partir das observações do ambiente, tornaria efetivamente autônomo o robô móvel. Entre as diversas pesquisas desenvolvidas, observa-se que o uso de técnicas que aplicam o Filtro de Kalman Extendido, EKF, é o mais difundido (Guivant e Nebot, 2001; Golfarelli *et al.*, 2001; Becker e Wullschleger, 2000, etc.). O presente trabalho procura dar um passo na direção da implementação de técnicas de mapeamento em robôs móveis com o emprego de sensor laser. Para tal deve-se deixar claro que neste trabalho estão sendo focados ambientes simples tipo *indoor* que podem ser completamente modelados através de mapas bidimensionais (2-D).

2. MAPEAMENTO

O objetivo do mapeamento (*Map-Building*) é produzir e atualizar automaticamente mapas dos ambientes *indoor* nos quais o robô móvel irá se deslocar. Este mapa será por ele utilizado para

autolocalização no ambiente sem a necessidade de modificá-lo, ou seja, sem introduzir marcas de referência artificiais no ambiente que funcionariam como referência para o robô zerar os erros de posicionamento (um exemplo clássico de marcas de referência artificiais é o emprego de códigos de barras em portas e paredes). O termo *mapa* deve ser compreendido como uma representação, ou modelagem, em 2 ou 3-D do ambiente, feita através do processamento das informações adquiridas por sensores que o estão monitorando constantemente (Leonard e Durrant-Whyte, 1992). Quanto aos tipos de mapas, pode-se classificá-los em dois grupos bem distintos, independentemente de serem 2 ou 3-D: mapas topológicos (*topological maps*) e mapas métricos (*metric maps*). O primeiro grupo representa o ambiente através de grafos, sendo que os nós representam lugares, marcas, etc. e os arcos, a existência de um trajeto entre dois nós (Thrun e Bücker, 1996; Dudek *et al.*, 1996; Nagatani *et al.*, 1998 e Arleo *et al.*, 1999). Já os mapas métricos são baseados na extração das características físicas do ambiente. Há alguns anos, no início do desenvolvimento de pesquisas com mapas métricos, o ambiente a ser mapeado era representado através de *grids*, ou seja, grades compostas de células que possuíam valores associados que indicavam serem estas células ocupadas, ou não (Elfes, 1989). Infelizmente o emprego da representação por *grids* possui algumas desvantagens: não produz mapas muito exatos pois, a exatidão do mapa depende do tamanho da célula utilizada (células menores implicam em um número maior de células a serem processadas) e, o alto custo computacional associado, pois todas as células têm de ser reiniciadas a cada passo da exploração do ambiente. Ao invés disto, atualmente trabalha-se diretamente com os sinais dos sensores para a extração das características do ambiente, *features* (Castellanos *et al.*, 1998; Castellanos *et al.*, 1999; Wullschleger *et al.*, 1999; Becker e Wullschleger, 2000), ou diretamente com os dados dos sensores, *Raw Data* (Thrun *et al.*, 2000). Observa-se na Tabela 1 uma comparação entre estes dois grupos de mapas (Thrun e Bücker, 1996).

Tabela 1. Comparação entre mapas métricos e topológicos (Thrun e Bücker, 1996).

Mapas Métricos	Mapas Topológicos
✓ Fácil de construir, representar e atualizar	✗ Difícil de construir e atualizar em ambientes complexos
✓ A autolocalização no ambiente é feita através da geometria, não sendo ambígua e dependente da posição	✗ A autolocalização no ambiente é feita através de marcas de referência no ambiente, podendo ser ambígua
✓ O planejamento e otimização de trajetórias são fáceis de implementar	✗ Pode produzir trajetórias sub-ótimas
✗ Exige uma determinação acurada da posição do robô	✓ Não necessita da determinação acurada da posição do veículo
✗ Opção pobre para se obter uma solução simbólica do planejamento de trajetórias	✓ Ótima opção para trabalhar de modo simbólico o planejamento de trajetórias
✗ A complexidade da representação exige um espaço de memória embarcada considerável	✓ Não exige muita memória para armazenamento de dados

A construção e atualização de mapas em tempo real, independentemente do tipo de sensor a ser empregado, consistem resumidamente dos seguintes passos:

1. Obter através de algum sensor ou da fusão de sensores (pe.: câmeras de vídeo, ultra-som, infravermelho, laser, etc.) dados sobre a área circunvizinha ao robô móvel;
2. Extrair as características do ambiente (*features*) dos dados obtidos;
3. Comparar as características observadas com as já mapeadas anteriormente e encontrar as mais similares no mapa, “casando-as” (*matched features*);
4. Estimar a posição do veículo no ambiente através das características identificadas (“casadas”);
5. Reavaliar o posicionamento das características baseado na “nova” posição do robô móvel;
6. Atualizar o mapa, re-posicionando as características identificadas e introduzindo as não identificadas como sendo novas características observadas.

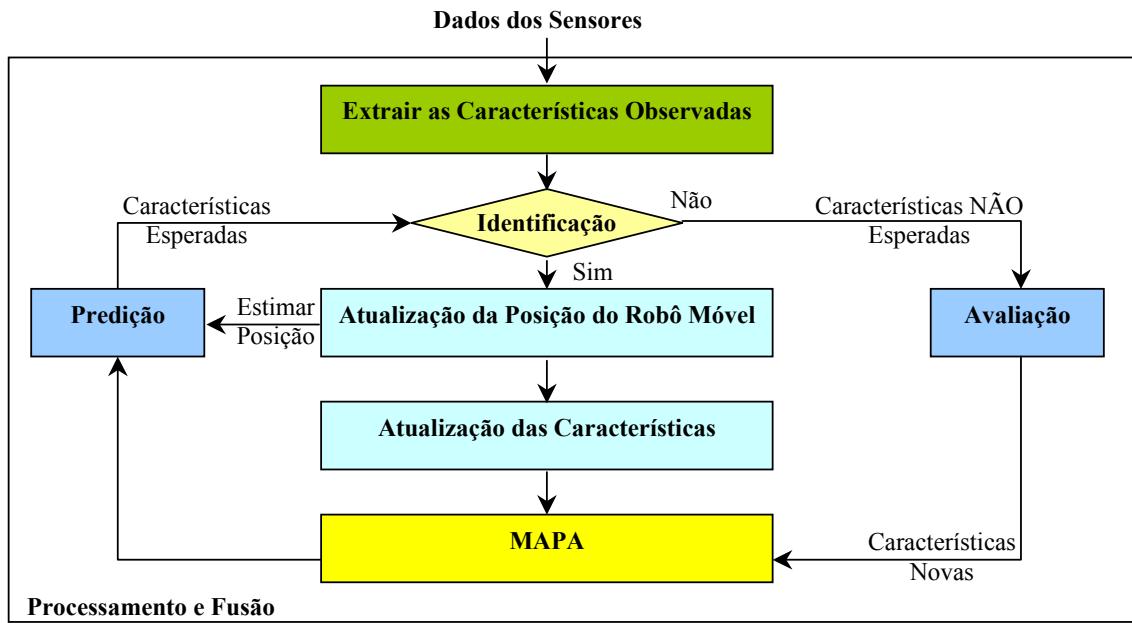


Figura 2. Fluxograma clássico para mapeamento e localização simultâneos – SLAM. Rotinas de Processamento e Fusão dos dados (Leonard e Durrant-Whyte, 1992).

Observa-se claramente que além dos procedimentos mostrados acima, é necessário também aplicar uma estratégia de mapeamento, ou seja, definir como o robô móvel irá desbravar o ambiente desconhecido, buscando características novas a serem incorporadas ao mapa. É possível encontrar na literatura diversas estratégias para a exploração de ambientes. Partindo da premissa que o mais importante não é apenas o tempo gasto para concluir o mapa mas também a sua qualidade, pode-se afirmar que as estratégias de exploração mais eficientes são baseadas no *Supervised Wall-Following* (Lee e Recce, 1997).

Esta estratégia baseia-se em seguir paredes próximas ao robô móvel e obter o maior número possível de informações sobre o ambiente enquanto for possível seguí-las. É claro que a todo instante deve-se verificar se o deslocamento do robô para uma dada posição não irá ocasionar uma colisão com um obstáculo ou, até mesmo, com outra parede. Verifica-se então que para realizar uma tarefa de mapeamento de um ambiente, o robô móvel está constantemente utilizando as rotinas de navegação e desvio de obstáculo, sempre planejando manobras e evitando que essas possam danificá-lo. Dessa forma, pode-se de um modo mais geral representar a tarefa de mapeamento através da Figura 3.

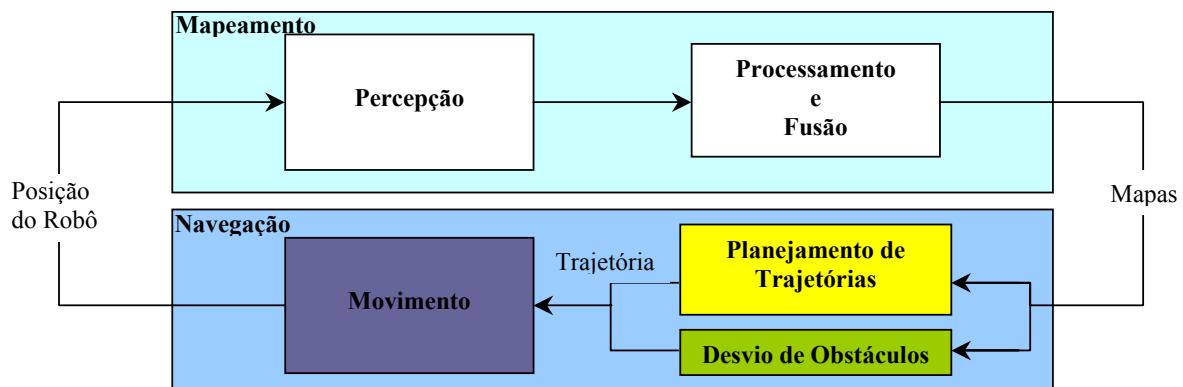


Figura 3. Fluxograma de SLAM mostrando a iteração da tarefa de mapeamento com navegação e desvio de obstáculos.

A estratégia de exploração que será adotada futuramente, supondo mapeamento de ambientes tipo *indoor*, foi baseada nas técnicas de *Supervised Wall-Following* e *Boundaries*. Nessa última assume-se que o ambiente a ser mapeado pode ser representado por cadeias fechadas (*closed-loops*) e que o robô móvel seguirá a parede pertencente ao *loop* aberto mais próximo até fechá-lo. Feito isto, ele segue para o *loop* aberto mais próximo e assim sucessivamente. Quando não existirem mais *loops* abertos no mapa, a exploração é finalizada. Observa-se que cada elemento deste *loop* é uma linha e que, para o fechamento do *loop* é permitido que linhas próximas sejam unidas, ou fundidas, em uma única linha. A correta determinação deste parâmetro, ou seja, o quanto próximas as linhas devem estar para serem fundidas em uma só, pode evitar que durante a exploração o robô móvel realize manobras repetitivas, tentando detalhar áreas já mapeadas.

Como a posição do robô móvel pode ser descrita em 2-D, tem-se que em um sistema de Coordenadas Cartesianas, ela é descrita por suas coordenadas (x , y) e, por sua orientação, φ , em relação ao eixo z :

$$P = \begin{bmatrix} x \\ y \\ \varphi \end{bmatrix} \quad (1)$$

Para a exploração do ambiente, o veículo assume sua posição inicial $[x_0, y_0, \varphi_0]^T$ como sendo a posição do sistema de coordenadas global, ou inercial. Feito isto, o veículo pode iniciar sua movimentação para explorar o ambiente. Deve-se observar que o número de medições necessárias para finalizar a exploração do ambiente depende da sua complexidade e dimensões e, da correta escolha dos parâmetros utilizados para fundir as linhas e fechar os *loops*.

3. EXTRAÇÃO DE LINHAS

O método de extração de linhas visa a redução do volume de dados a serem processados durante o mapeamento de ambientes (veja Figura 4). Ou seja, os *features* empregados no mapeamento não são diretamente os dados dos sensores, mas sim as linhas extraídas a partir desses dados. Em geral, emprega os dados dos sensores em coordenadas polares, para facilitar a combinação das características das linhas que compõem os contornos do ambiente. Entretanto, para a aplicação de tal procedimento, é necessário primeiro estabelecer algumas condições necessárias:

1. O mapeamento será feito em 2-D;
2. O ambiente a ser mapeado pode ser suficientemente bem representado em 2-D, ou seja, todos os contornos do ambiente mantêm sua forma ao longo do eixo vertical;
3. Os limites de resolução dos sensores empregados devem ser respeitados;
4. O tipo de sensor utilizado define como seus dados serão trabalhados para a extração de linhas. Por exemplo, sensores laser são mais sujeitos a problemas de reflexão devido à natureza do material em que o feixe incide do que devido à incidência próxima a cantos vivos; situação inversa ocorre com sensores tipo ultra-som;

No exemplo de aplicação da técnica de extração de linhas mostrado na Figura 4, observa-se em (a) dados oriundos de 2 sensores laser SICK LMS 200 que forneceram informações de $0,5^\circ$ em $0,5^\circ$ dos 360° da vizinhança da posição do robô móvel. Isso totalizou 722 pontos coletados pelo sensor que deveriam ser empregados nas rotinas de mapeamento. Em (b), considerando-se apenas os dados distantes até 3 m da posição do robô móvel ($0, 0, 0^\circ$), observa-se as 9 linhas extraídas a partir dos dados do sensor laser. Ou seja, conseguiu-se uma redução de aproximadamente 80 vezes do volume de dados a ser processado nesse ambiente e nesse instante da exploração e confecção do mapa.

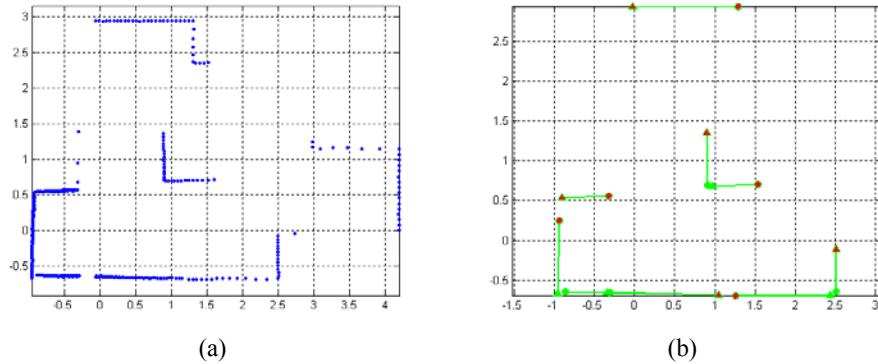


Figura 4. Exemplo de aplicação da técnica de extração de linhas para dados de sensor laser.

4. IMPLEMENTAÇÃO

Para a implementação das rotinas de extração de linhas foram utilizados dados de sensores laser SICK LMS 200. Dois sensores foram posicionados de forma a coletarem dados de 360º da área circunvizinha ao robô móvel.

Todas as rotinas foram inicialmente desenvolvidas em MatLab, para depois de validadas serem implementadas em C++ e QNX, visando uma aplicação embarcada e em tempo real. O desenvolvimento das rotinas de extração de linhas empregou princípios básicos de geometria analítica e álgebra linear, como por exemplo: interpolação de retas, medidas de distâncias de pontos a reatas, transformação de coordenadas, etc. seguiu os seguintes passos, ilustrados pelas figuras seguintes:

1. Utiliza-se o Sistema de Coordenadas Polares ao invés do Sistema de Coordenadas Cartesianas, desta forma, cada medida feita pelo sensor (P_i) terá coordenadas na forma $(r_i; \alpha_i)$ – Figura 5;

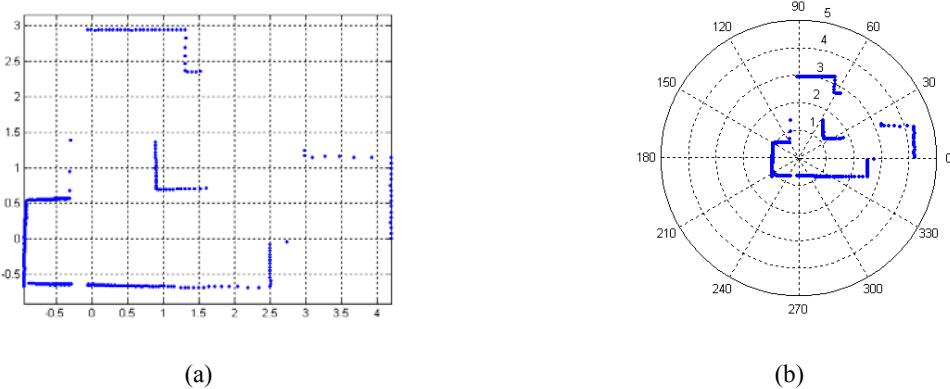


Figura 5. Dados do sensor laser SICK LMS 200 em coordenadas cartesianas (a) e polares (b).

2. Para cada ponto P_i , interpolar segmentos de retas que passem por ele e pelos pontos imediatamente anterior e posterior, ou seja, P_{i-1} e P_{i+1} (Figura 6);
3. Verificar os coeficientes das equações das retas obtidas (α_i) e sua distância à origem do Sistema de Coordenadas Polar (r_i) – Figura 7;
4. Caso estes valores estejam próximos, dentro de uma faixa aceitável, unir os pontos em conjuntos e interpolar uma reta para os pontos de cada conjunto (Figura 8).

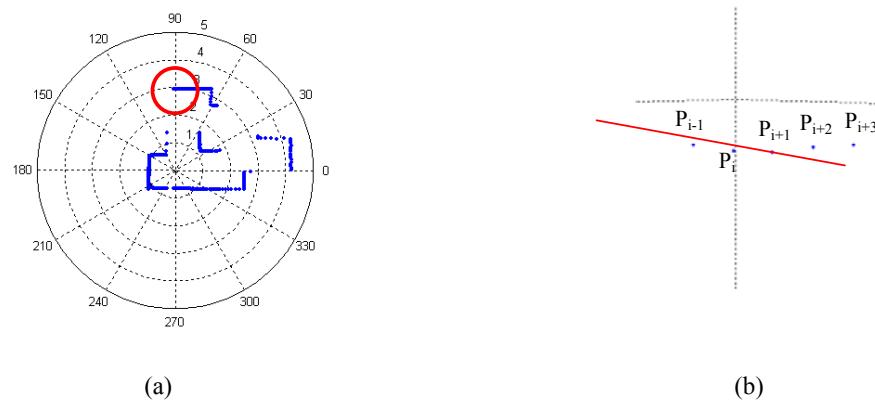


Figura 6. Detalhe de região detectada pelo sensor laser SICK LMS 200 em coordenadas polares (a) e interpolação dos segmentos de reta para P_i , P_{i-1} e P_{i+1} (b).

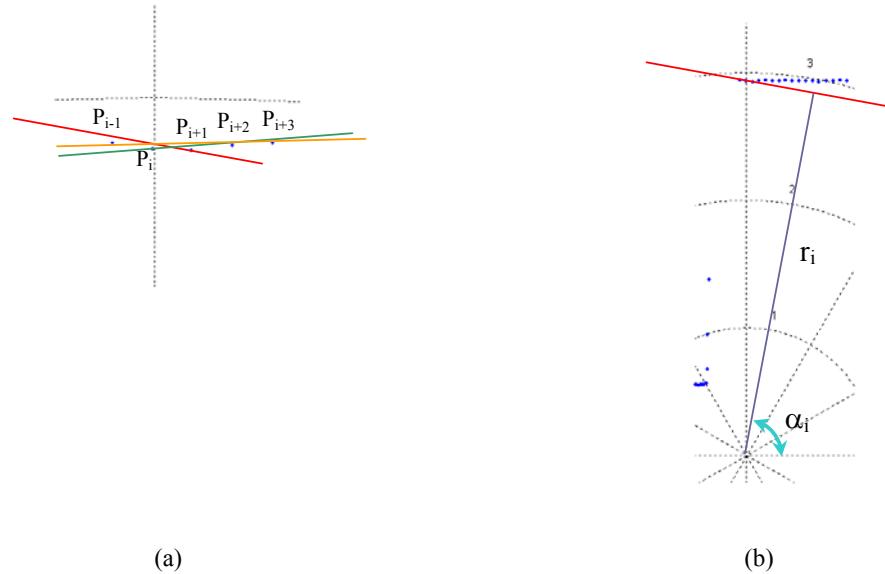


Figura 7. Segmentos de reta interpolados de P_{i-1} a P_{i+3} (a) e detalhe de como é medida a distância r_i da reta interpolada à origem do sistema de coordenadas global e do ângulo α_i .

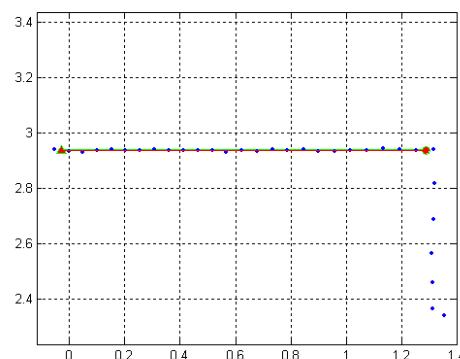


Figura 8. Segmento de reta interpolado para o conjunto de pontos que possuíam valores de r_i e α_i dentro do limite pré-estabelecido.

Desta forma, o mapa terá linhas como características extraídas do ambiente e não pontos, diminuindo assim drasticamente o volume de dados a serem processados durante o mapeamento e autolocalização. A implementação foi realizada tendo os seguintes valores para as faixas de variação aceitáveis para fusão de pontos em conjuntos:

Tabela 2. Faixas de variação aceitáveis.

Variável	Valor
Módulo da distância máxima entre pontos consecutivos (p.e.: P_{32} e P_{33})	0,30 m
Módulo da diferença máxima entre coeficientes angulares	30°
Diferença máxima entre distância das retas interpoladas à origem do sistema de coordenadas global	0,15 m
Distância máxima da origem do sistema de coordenadas global	3,0 ~ 4,0 m
Número mínimo de pontos para compor uma linha extraída	4

5. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

A seguir são apresentados resultados experimentais obtidos com a aplicação das rotinas desenvolvidas. Deve-se observar que a posição dos sensores sempre é em (0, 0, 0°) do sistema de referência global. Os ambientes mapeados foram construídos no Laboratório através do emprego de placas de compensado visando simular ambientes simples que pudessem atender aos requisitos de aplicação da técnica previamente listados.

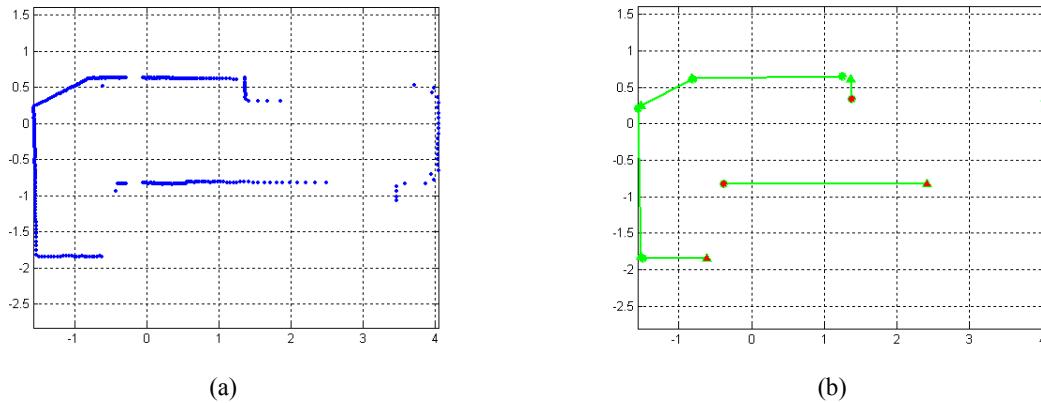


Figura 9. Exemplo de aplicação da técnica de extração de linhas – 7 linhas extraídas para uma distância máxima de 4 m à origem do sistema de referência global.

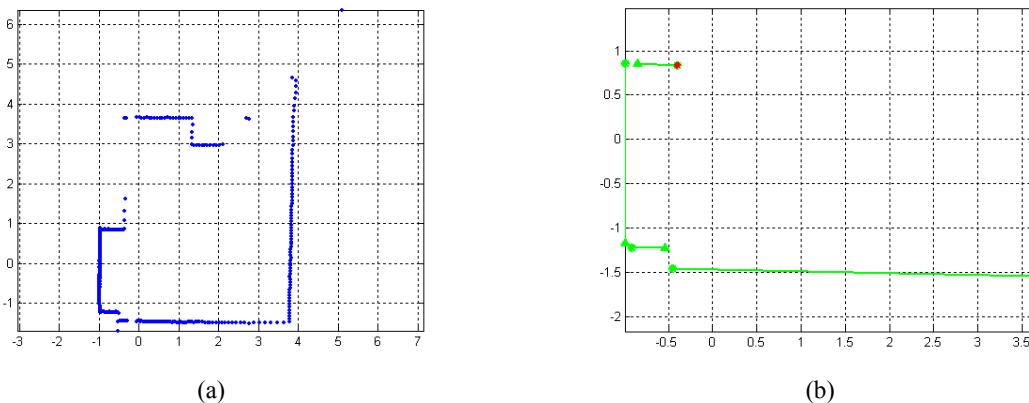


Figura 10. Exemplo de aplicação da técnica de extração de linhas – 4 linhas extraídas para uma distância máxima de 3,5 m à origem do sistema de referência global.

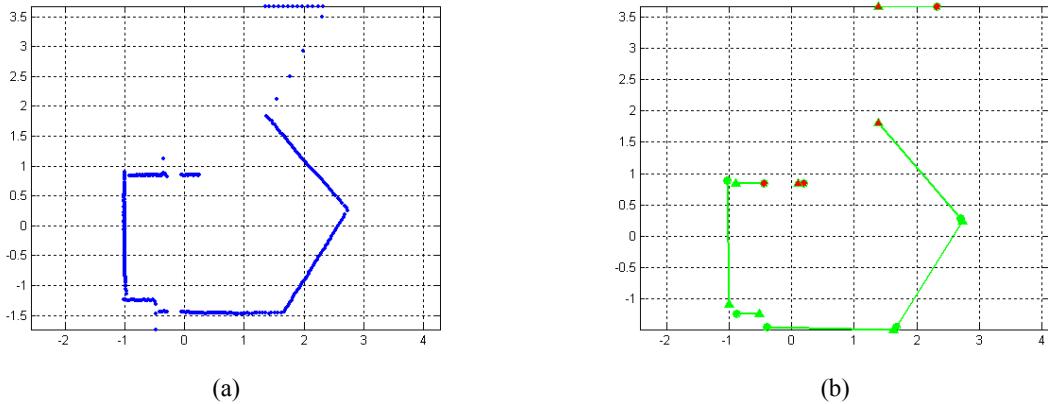


Figura 11. Exemplo de aplicação da técnica de extração de linhas – 8 linhas extraídas para uma distância máxima de 4 m à origem do sistema de referência global.

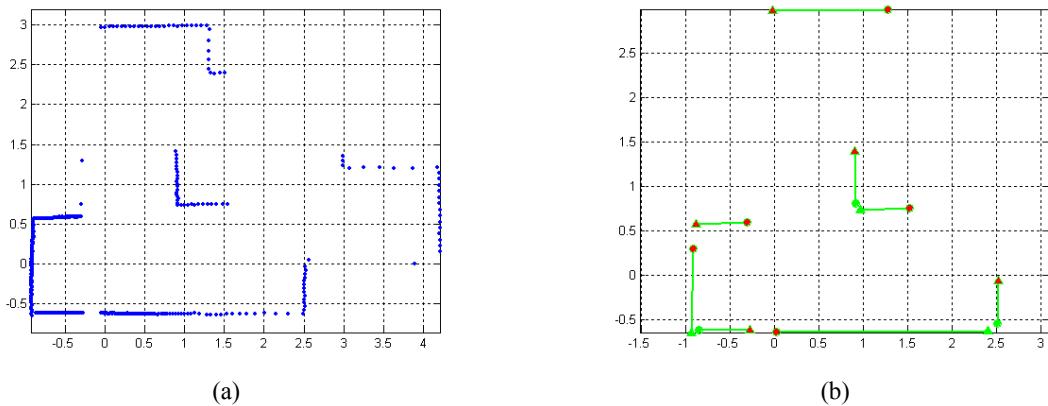


Figura 12. Exemplo de aplicação da técnica de extração de linhas – 8 linhas extraídas para uma distância máxima de 4 m à origem do sistema de referência global.

6. CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS

Observa-se pelos resultados obtidos com a aplicação da técnica de extração de linhas que foi possível reduzir consideravelmente o volume de dados a serem processados durante a fase de SLAM. Isto facilita consideravelmente a implementação de procedimentos de mapeamento em tempo real. Deve-se ressaltar que todas as rotinas são embarcadas no robô móvel, ou seja, não há nenhum tipo de pós-processamento externo dos dados dos sensores. Como próximos passos do desenvolvimento do projeto pode-se citar o desenvolvimento do EKF, o estudo de estratégias de mapeamento de ambientes *indoor*, e a implementação de todas as rotinas em C++ e QNX visando seu emprego em tempo real.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Arleo, A. *et al.*, 1999, "Efficient learning of variable-resolution cognitive maps for autonomous indoor navigation", IEEE Trans. on Robotics & Automation, Vol. 15, N. 6, pp. 990-1000.

Becker, M. e Wullschleger, F., 2000, "Theory and experimental results of map building using laser scanners and an mobile robot - SmartROB-2", Proc. of CONEM 2000 National Congress of Mechanical Engineering, Natal . RN, Brazil, Aug. 7 - 11, 2000, CD-ROM, paper code: AC9638.

Castellanos, J. A. *et al.*, 1998, "Simultaneous map building and localization for mobile robots: a

- multisensor fusion approach”, In Proceedings of the 1998 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 1244-1249.
- Castellanos, J. A. *et al.*, 1999, “The SPmap: a probabilistic framework for simultaneous localization and map building”, IEEE Trans. on Robotics and Automation, Vol. 15, N. 5, pp. 948-952.
- Castellanos, J. A. *et al.*, 2001, “Multisensor fusion for simultaneous localization and map building”, IEEE Transaction on Robotics and Automation, Vol. 17, N. 6, pp. 908 – 914.
- Dissanayake, M. W. M. G., *et al.*, 2001, “A solution to the simultaneous localization and map building (SLAM) problem”, IEEE Transaction on Robotics and Automation, Vol. 17, N. 3, pp. 229 – 241.
- Dudek, G. *et al.*, 1996, “Mapping in unknown graph-like worlds”, Journal of Robotic Systems, Vol. 13, N. 8, pp. 539-559.
- Elfes, A., 1989, “Occupancy Grids: A Probabilistic framework for Robot Perception and Navigation”, Ph.D. Thesis, Electrical and Computer Engineering Department / Robotics Institute, Carnegie-Mellon University - USA, 1989.
- Golfarelli, M. *et al.*, 2001, “Correction of dead-reckoning errors in map building for mobile robots”, IEEE Transaction on Robotics and Automation, Vol. 17, N. 1, pp. 37 – 47.
- Guivant, J. E. e Nebot, E. M., 2001, “Optimization of the simultaneous localization and map-building algorithm for real-time implementation”, IEEE Transaction on Robotics and Automation, Vol. 17, N. 3, pp. 242 – 257.
- Lee, D. e Recce, M., 1997, “Quantitative evaluation of the exploration strategies of a mobile robot”, International Journal of Robotics Research, Vol. 16, N. 4, pp. 413-447.
- Leonard, J. J. e Durrant-Whyte, H. F., 1992, “Directed sonar sensing for mobile robot navigation”, Kluver Academic Publishers, 350 p.
- Nagatani, K. *et al.*, 1998, “Towards exact localization without explicit localization with the generalized Voronoi graph”, In Proceedings of the 1998 IEEE Int. Conf. on Robotics & Automation, pp. 342-348.
- Thrun, S. e Bücken, 1996, “A Integrating grid-based and topological maps for mobile robot navigation”, In Proceedings of the 3rd National Conf. on Artificial Intelligence AAAI.
- Thrun, S. *et al.*, 2000, “A real-time algorithm for mobile robot mapping with applications to multi-robot and 3D mapping”, In Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation.
- Thrun, S., 2004, Homepage: <http://robots.stanford.edu/index.html>: acessado em Janeiro de 2004.
- Wullschleger, F. H. et al., 1999, “A flexible exploration framework for map building”, In Proceedings of the 3rd European Workshop on Advanced Mobile Robots EUROBOT99.

LINE EXTRACTION TECHNIQUE APPLIED TO 2D INDOOR ENVIRONMENT MAPPING BUILDING USING A LASER SCANNER ONBOARD A MOBILE ROBOT

Abstract. This work relates the first step of indoor environments Mapping Building Procedures implementation using laser scanner SICK LMS 200. The line extraction technique is used to reduce the data quantity. The implementation of the routines is based on the hypothesis that the environment can be well represented by a 2D map. The results obtained were encouraged and the routines will be implemented in C++ soon.