

Mapeamento de Terrenos Utilizando Robôs Móveis e Sensor Laser

Alberto Yukinobu Hata, Denis Fernando Wolf

Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação (ICMC),
Universidade de São Paulo (USP), São Carlos, SP, Brasil
`{hata,denis}@icmc.usp.br`
<http://www.icmc.usp.br/~lrm/>

Resumo This paper describes a tridimensional mapping method developed to allow the operation of mobile robots in outdoor environments using 2D laser sensors. Experimental tests showed the precision of presented techniques, making possible building accurate models of environment traversed by the robot. In this paper it is presented also preliminary classification results with respect to mapped terrain navigability.

Key words: Mapeamento de ambientes, robôs móveis autônomos, classificação de terrenos, sensor laser 2D

1 Introdução

A robótica móvel é um ramo da robótica que desenvolve dispositivos com a capacidade de se locomoverem autonomamente para realizarem determinadas tarefas. Por esse motivo, os robôs necessitam de mecanismos de percepção como lasers e câmeras para obter informações do ambiente e criar mapas desses locais, podendo posteriormente detectar os possíveis obstáculos.

Nos últimos anos, através da competição entre veículos autônomos promovida pela agência militar norte-americana (DARPA), a comunidade científica tem direcionado parte das pesquisas da robótica móvel para a área de automação de veículos. Foram obtidos diversos trabalhos com ótimos resultados, dentre eles, estão em destaque os veículos autônomos desenvolvidos pelas equipes vencedoras [1][2]. A primeira edição desse evento ocorreu em 2004, sendo que nenhuma equipe conseguiu completar a prova, mostrando a grande dificuldade desse desafio. No ano seguinte, as equipes realizaram grandes aperfeiçoamentos no sistema de controle do robô (carro), resultando na vitória do time da Universidade de Stanford [1]. Em sua última edição, ocorrida em 2007, a prova ficou centralizada na execução de tarefas nas regiões urbanas de Califórnia, tornando-se necessário seguir as regras de trânsito local. Apesar da complexidade do problema, várias equipes conseguiram completar a prova, indicando um grande avanço nas pesquisas da robótica móvel.

Considerando o progresso na automatização veicular e também as vantagens que ela poderá trazer para a sociedade, tem-se em vista o desenvolvimento de

um robô móvel capaz de atuar em ambientes externos como vias e terrenos acidentados. O robô deverá mapear terrenos e detectar os obstáculos em ambientes desestruturados utilizando sensor laser e assim, estabelecer os caminhos mais seguros e mais curtos até seu objetivo. A partir dessa idéia, visa-se estender o sistema para veículos urbanos, tornando-os completamente autônomos, dispensando a intervenção do homem no controle dos mesmos. Este artigo descreve a primeira etapa do processo de automatização do robô que consiste no método de mapeamento tridimensional de ambientes utilizando um sensor laser 2D. É apresentado também as fases iniciais do processo de classificação do terreno mapeado em porções navegáveis e não navegáveis e os resultados preliminares. As sessões seguintes abordarão o processo de aquisição de dados, os algoritmos utilizados, criação e classificação dos mapas virtuais e alguns resultados obtidos.

1.1 Trabalhos Correlatos

A tarefa de mapeamento de ambientes, devida a sua importância na robótica, tem motivado a publicação de vários trabalhos pela comunidade científica. Na literatura pode-se encontrar diversos métodos de mapeamento. Dentre elas pode-se destacar a técnica apresentada por [3] para gerar mapas fiéis do terreno utilizando-se um sensor laser 2D. Para corrigir ruídos presentes no mapa gerado, foi desenvolvido um filtro que remove pixels corrompidos e dados perdidos. Em uma outra abordagem, Thrun [4] apresenta um sistema multi-robótico equipado com sensor laser para permitir a construção de mapas tridimensionais de ambientes cíclicos em tempo real. Para criar mapas tridimensionais de construções urbanas com alta precisão, o método proposto por [5] associa as imagens capturadas pela câmera com os dados obtidos pelo laser. Com isso, pôde-se efetuar a estimação do movimento do robô e possibilitar a construção de mapas 3D detalhados.

Além desses trabalhos, existem outros dedicados à extração de informações sobre as regiões navegáveis dos terrenos mapeados. O conhecimento das áreas navegáveis é fundamental para possibilitar a condução do robô pelo terreno. Em [6], o mapeamento é efetuado por meio de um sensor laser 2D associado ao odômetro e a um IMU. Na técnica utilizada, regiões planas são classificadas como navegáveis e regiões irregulares (grama, cascalho) são classificadas como não navegáveis. O algoritmo de classificação é baseado no Modelo Oculto de Markov, no qual permite corrigir pequenos erros de classificação. No trabalho apresentado por [7] é investigado uma técnica de mapeamento de ambientes externos utilizando laser 3D para permitir a navegação de robôs autônomos dentro de vegetações. No caso de Lalonde [8], foi aplicado um sensor laser 3D para realizar a classificação de todo o ambiente. Os elementos do cenário podem ser segmentados em três classes, sendo elas, superfície (e.g. chão), estruturas lineares (e.g. cabos, troncos de árvores) e estruturas dispersas (e.g. grama). A segmentação é realizado por meio de um classificador bayesiano.

Câmeras também têm sido amplamente empregadas na classificação do terreno navegável. Em [9] é apresentado um método de segmentação de terreno que combina as informações de um sensor laser e de imagens capturadas por uma

câmera. A partir das cores e texturas das imagens, o terreno pode ser classificado em totalmente desestruturado, cascalho e asfalto. Uma metodologia diferenciada pode ser encontrada em [10]. Nela é utilizada uma câmera e um sensor de vibração para identificar o tipo do terreno percorrido pelo robô.

2 Mapeamento

O processo de mapeamento constitui uma importante tarefa para a automatização do robô [4] [6]. Será através dos mapas que o robô saberá como chegar a um determinado local e estimar a sua posição [11]. Por essa razão, sem o auxílio dos mapas, o robô dificilmente poderá navegar de forma autônoma pelo ambiente.

O mapeamento permite a recriação do cenário real no computador a partir dos dados coletados por um determinado sensor. De um modo geral, o seu algoritmo consiste na transformação das coordenadas locais dos dados capturados pelo sensor em coordenadas globais relativas ao robô. Dentre os sensores mais comuns estão o laser e a câmera.

O sensor abordado neste trabalho é o laser 2D. Esse tipo de sensor possui a vantagem de ter alta precisão, capacidade de adquirir diretamente a distância até os obstáculos e as suas leituras são pouco influenciadas pela variação das condições ambientais.

Neste trabalho, a tarefa de mapeamento atua como uma interface de aquisição de dados do ambiente e os traduz em informações interpretáveis para o robô, permitindo a identificação das rotas mais seguras. Ressalta-se também que o mapeamento consiste na primeira etapa do processo de automatização do robô. Dessa forma, a coleta de dados do ambiente é realizado com o auxílio de um robô teleoperado. Além disso, a localização é conhecida a todo instante pelo robô. A seguir são apresentados os dois métodos de mapeamento implementados, a de terreno e a de ambiente.

2.1 Mapeamento de Terreno

Para realizar o mapeamento do terreno, foi utilizado um sensor laser 2D com uma inclinação de -10° em relação ao plano. Nesta configuração, o laser é capaz de detectar objetos que estão a aproximadamente 2 metros à frente do robô. O laser está configurado para realizar uma leitura de 181 pontos à 10hz. Cada ponto da leitura é representado por um valor que corresponde a distância entre o sensor laser e o objeto detectado. Este sensor foi equipado no robô Pioneer AT que está preparado para trabalhar em ambientes externos (figura 1).

Na recriação do ambiente é necessária, além dos dados coletados pelo sensor laser, a informação referente ao deslocamento do robô na qual é obtido através do odômetro. Utilizando-se este dispositivo, será possível calcular a posição do objeto detectado pelo laser.

O primeiro passo para construção do mapa é a análise dos componentes que formam o feixe do laser no plano zx (figura 2). Conhecendo-se os valores de H e



Figura 1. Robô *Pioneer AT* utilizado nos experimentos.

D , pode-se determinar a distância longitudinal d e a altura do ponto l_z detectado pelo laser. Realizando-se os cálculos trigonométricos, determina-se que:

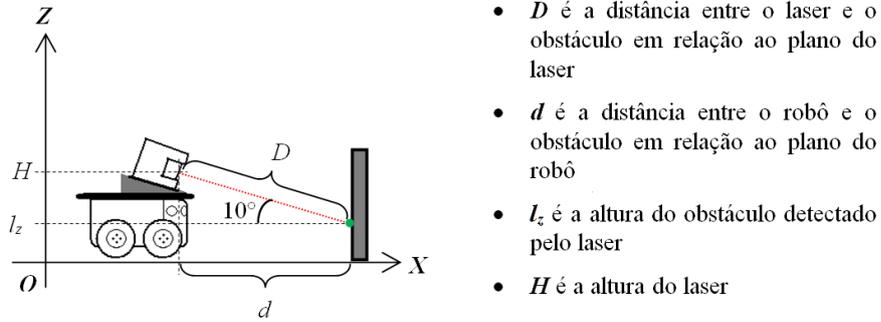


Figura 2. Decomposição do feixe do laser no plano xz .

$$d = D \cdot \cos(10^\circ). \quad (1)$$

$$l_z = H - D \cdot \sin(10^\circ). \quad (2)$$

O cálculo das coordenadas x e y do obstáculo é obtido utilizando-se os dados da posição do robô. Na figura 3 pode-se visualizar o mesmo modelo de escaneamento do laser da figura 2 visto por cima. Com o triângulo ABC, podem-se determinar a coordenada l_x e l_y do obstáculo que possui a seguinte expressão:

$$l_x = p_x + D \cdot \cos(\theta + \alpha). \quad (3)$$

$$l_y = p_y + D \cdot \sin(\theta + \alpha). \quad (4)$$

As coordenadas l_x , l_y e l_z são referentes a apenas um ponto da leitura do laser. Dessa forma, são feitas sucessivas transformações dos pontos lidos para se

ter um mapa denso com os elementos do mundo real. Dessa forma, o algoritmo para o mapeamento consiste basicamente em obter os valores de l_x , l_y e l_z para todos os pontos adquiridos a cada leitura feita pelo laser.

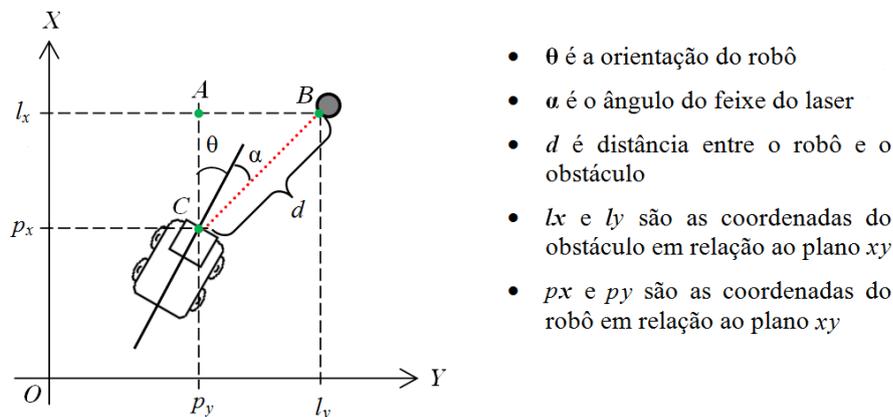


Figura 3. Decomposição do feixe do laser no plano xy .

2.2 Mapeamento de Ambientes

Com o intuito de verificar a eficiência do algoritmo e a precisão do laser, foram executados experimentos alternativos com o laser. Assim, ao invés de coletar pontos do terreno, direcionou-se o sensor laser para cima para efetuar o mapeamento do ambiente. Dessa forma, foram adequadamente adaptadas as expressões de l_x , l_y e l_z , calculadas anteriormente.

Analogamente ao processo realizado no mapeamento de terreno, primeiramente foi decomposto os componentes do laser (figura 4) obtendo-se os valores l_z e l_w :

$$l_z = D \cdot \sin(\theta). \tag{5}$$

$$l_w = D \cdot \cos(\theta). \tag{6}$$

Em seguida, foi analisado o robô no plano xy para se determinar as coordenadas x e y do ponto lido (figura 4). Dessa forma, pode-se obter as coordenadas do ponto lido pelo laser em relação à posição do robô. Foram obtidas as seguintes expressões para l_x e l_z :

$$l_x = p_x + l_w \cdot \sin(\alpha). \tag{7}$$

$$l_z = H - D \cdot \sin(10^\circ). \tag{8}$$

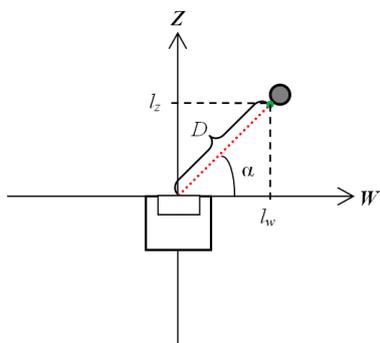


Figura 4. Elementos do feixe de laser apontado para cima.

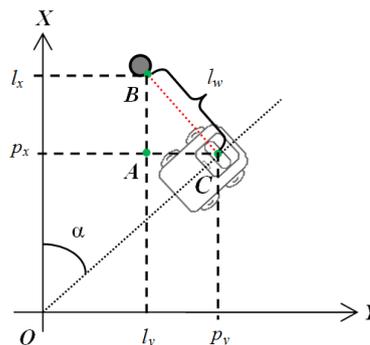


Figura 5. Elementos do feixe do laser e posição do robô.

3 Representação Bidimensional de Terrenos

As representações tridimensionais dos terrenos gerados pelo algoritmo de mapeamento, a princípio, não trazem informação sobre quais porções do mapa são seguros para a passagem do robô e quais devem ser evitadas. Dessa forma, é importante a utilização de ferramentas para a representação das regiões navegáveis e não-navegáveis do mapa.

Com isso, após a etapa de mapeamento, os dados do terreno são transferidos para um grid bidimensional, onde cada célula armazena um valor que indica o índice de navegabilidade do terreno. Assim, quanto maior o valor desse índice, maior será a facilidade do robô atravessar a respectiva célula. Cada célula do grid tem tamanho fixo de $0,5\text{cm} \times 0,5\text{cm}$.

Foram implementados dois métodos para o cálculo do índice de navegabilidade das células. No primeiro, inicialmente é extraído os valores da altura de cada ponto do mapa e posteriormente determinada a célula que corresponde com a posição do ponto. O valor da altura armazenada previamente na célula será substituída, caso a altura atual seja maior. O segundo método possui a mesma idéia que a primeira, porém é armazenada a maior diferença de altura entre as suas células adjacentes.

No método em que utiliza apenas a altura do ponto, é criada uma mapa bidimensional com a altura relativa ao robô. Sendo assim, cada célula indica o grau de desnivelamento em relação ao plano do robô. Enquanto que no método de diferença das células, o mapa bidimensional do terreno permite visualizar a variabilidade da altitude do terreno. Conseqüentemente, neste último é possível analisar a inclinação do terreno a ser percorrido pelo robô.

A representação do índice de navegabilidade na célula é feita por meio de cores, sendo que quanto maior, tenderá ao verde e quanto menor, tenderá ao vermelho. Os obstáculos negativos são representados em tonalidade azul. Nas figuras 7 e 8 pode-se ver alguns exemplos de representação bidimensional do

terreno. Nessa classificação, é necessário definir também um limiar ϕ que determina um valor limite para o índice das células. Assim, caso um determinado ponto tenha uma altura ou diferença das alturas maior que ϕ , automaticamente será atribuída à célula um índice de navegabilidade 0. Para outros valores, serão calculados um índice de navegabilidade proporcional à faixa que estende de 0 à ϕ . Na figura 6 pode-se observar o resultado da variação de ϕ com três valores diferentes. Percebe-se que valores grandes de ϕ , aumentam a sensibilidade do classificador em relação aos pontos extremos do mapa e valores baixos de ϕ atenuam essa sensibilidade. Neste trabalho foi escolhido $\phi = 0,10$ por apresentar uma classificação mais próxima ao cenário real.

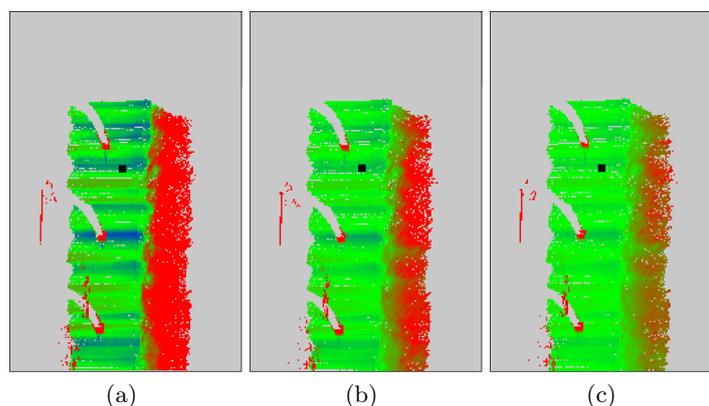


Figura 6. Mapas 2D do terreno ilustrando a elevação do terreno por meio de cores para diferentes valores de ϕ . (a) $\phi = 0,05$; (b) $\phi = 0,10$; (c) $\phi = 0,15$.

4 Resultados

O algoritmo de mapeamento de terrenos foi testado em locais parcialmente desestruturados com robôs reais. O primeiro ambiente analisado foi uma rampa de concreto com pequenas guias laterais, simulando uma pequena rua. Foram colocadas algumas caixas ao longo do trecho como se fossem pequenos obstáculos de forma a verificar se os mesmos seriam detectados pelo sensor laser. Na figura 7 pode-se visualizar uma comparação entre o ambiente real e o cenário criado a partir do mapeamento efetuado pelo robô. Nota-se que as caixas puderam ser reproduzidas nitidamente, mostrando a capacidade do sensor laser detectar com precisão até mesmo pequenos objetos presentes no ambiente. A representação em grid 2D do mesmo terreno também é mostrada logo em seguida. Nota-se que a classificação pôde distinguir claramente as áreas mais altas do mapa, como as guias e a vegetação, do chão. O método das diferenças relativas corrigiu alguns erros de classificação feitos pelo método da altura absoluta, porém, por ser

ainda um método ainda em desenvolvimento, observa-se trechos com erros de classificação.

No segundo experimento, o robô foi disposto entre um gramado e uma via trafegável. O objetivo deste teste consistiu em verificar através do mapa criado, se o laser era capaz de detectar leves variações de altitude de um local aparentemente plano. Através da figura 8(b) constata-se no mapa criado a nítida distinção entre o gramado e a região navegável pelo robô. No caso do mapa de classificação, é constatado um comportamento similar ao experimento anterior, entretanto, nesse caso, o método da diferença relativa conseguiu classificar com precisão o plano como via navegável. Mas não foi capaz de distinguir a grama do chão.

Para avaliar o algoritmo de mapeamento de ambientes, com o sensor laser inclinado para cima, foram realizados testes com o robô tanto em locais com elementos estruturados como prédios e desestruturados como árvores. Na figura 9 pode se visualizar os resultados obtidos. Nota-se que o mapa 3D gerado pôde representar com detalhes todos os elementos presentes no ambiente em comparação com a foto do cenário real.

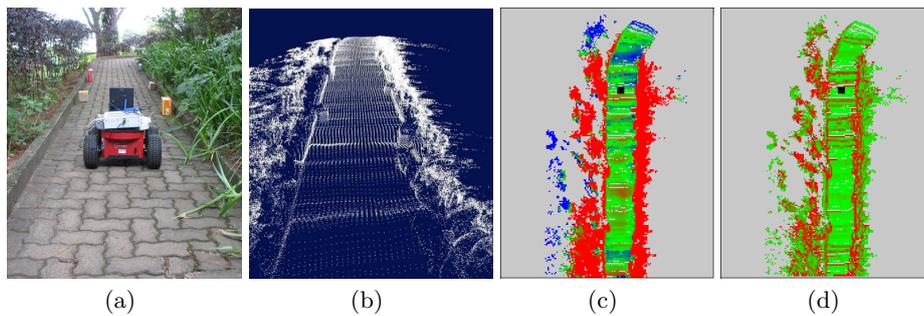


Figura 7. Mapeamento de uma via com guias e alguns obstáculos. (a)Foto do ambiente;(b)Mapa 3D do ambiente; (c)Mapa 2D destacando a altura absoluta dos pontos; (d)Mapa 2D destacando a diferença relativa da altura dos pontos.

5 Conclusão

Apesar de o trabalho se apresentar na fase inicial, o algoritmo de mapeamento se mostrou totalmente satisfatório para ser utilizado no robô. Os mapas criados puderam reproduzir fielmente os cenários percorridos pelo robô. Isto é muito importante, pois, quanto melhor a qualidade do mapa gerado, maior será a precisão do algoritmo de classificação. Além disso, foi implementado a fase inicial da classificação de terrenos, sendo realizado o processo de representação das regiões navegáveis por meio de um grid 2D e a extração de informações dos mapas

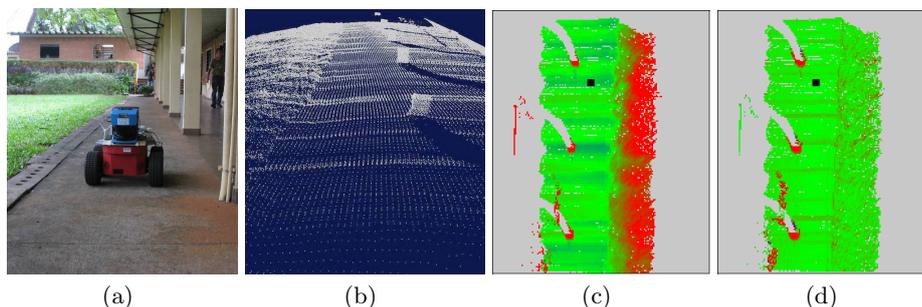


Figura 8. Mapeamento de uma via com vegetação baixa na lateral.(a)Foto do ambiente;(b)Mapa 3D do ambiente; (c)Mapa 2D destacando a altura absoluta dos pontos; (d)Mapa 2D destacando a diferença relativa da altura dos pontos.

tridimensionais do terreno, sendo que os resultados foram ilustrados nesse grid através de cores.

O próximo passo necessário para permitir a navegação autônoma do robô é o desenvolvimento de um algoritmo mais robusto para a classificação de terrenos que associe a informação sobre a altura da célula e a diferença entre as células. Uma das abordagens que se planeja utilizar é o uso de técnicas neuro-fuzzy para identificar os obstáculos do ambiente. A navegação do robô pelo ambiente deverá ser feita por meio de campos potenciais, aproveitando-se o índice de navegabilidade do terreno.

6 Agradecimentos

Os autores agradecem o auxílio oferecido pela FAPESP, processo 2008/02204-4, e CNPq e FAPESP ao INCT-SEC(Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia - Sistemas Embarcados Críticos), processo 573963/2008-9 e 08/57870-9.

Referências

1. Thrun, S., Montemerlo, M., Dahlkamp, H., Stavens, D., Aron, A., Diebel, J., Fong, P., Gale, J., Halpenny, M., Hoffmann, G., Lau, K., Oakley, C., Palatucci, M., Pratt, V., Stang, P., Strohband, S., Dupont, C., Jendrossek, L.E., Koelen, C., Markey, C., Rummel, C., van Niekirk, J., Jensen, E., Alessandrini, P., Bradski, G., Davies, B., Ettinger, S., Kaehler, A., Nefian, A., Mahoney, P.: Stanley: The robot that won the darpa grand challenge: Research articles. *J. Robot. Syst.* **23**(9) (2006) 661–692
2. Urmson, C., Anhalt, J., Bagnell, D., Baker, C., Bittner, R., Clark, M.N., Dolan, J., Duggins, D., Galatali, T., Geyer, C., Gittleman, M., Harbaugh, S., Hebert, M., Howard, T.M., Kolski, S., Kelly, A., Likhachev, M., McNaughton, M., Miller, N., Peterson, K., Pilnick, B., Rajkumar, R., Rybski, P., Salesky, B., Seo, Y.W., Singh, S., Snider, J., Stentz, A., Whittaker, W.R., Wolkowicki, Z., Ziglar, J., Bae, H.,

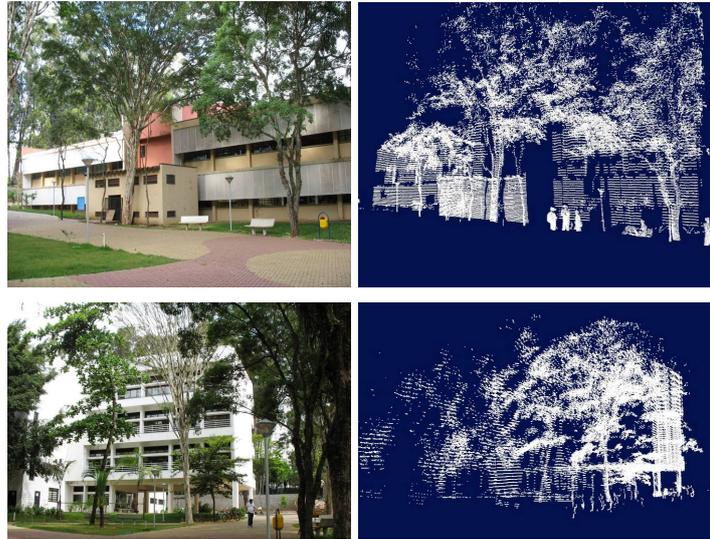


Figura 9. Mapeamento de ambientes realizado com o robô.

- Brown, T., Demitrish, D., Litkouhi, B., Nickolaou, J., Sadekar, V., Zhang, W., Struble, J., Taylor, M., Darms, M., Ferguson, D.: Autonomous driving in urban environments: Boss and the urban challenge. *J. Field Robot.* **25**(8) (2008) 425–466
3. Ye, C., Borenstein, J.: A new terrain mapping method for mobile robots obstacle negotiation. *Proceedings of the UGV Technology Conference at SPIE AeroSense Symposium* (2003) 52–62
 4. Thrun, S., Burgard, W., Fox, D.: A real-time algorithm for mobile robot mapping with applications to multi-robot and 3d mapping. *Robotics and Automation, 2000. Proceedings. ICRA '00. IEEE International Conference on* **1** (2000) 321–328 vol.1
 5. Bok, Y., Hwang, Y., Kweon, I.S.: Accurate motion estimation and high-precision 3d reconstruction by sensor fusion. *Robotics and Automation, 2007 IEEE International Conference on* (April 2007) 4721–4726
 6. Wolf, D., Sukhatme, G., Fox, D., Burgard, W.: Autonomous terrain mapping and classification using hidden markov models. *Robotics and Automation, 2005. ICRA 2005. Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on* (April 2005) 2026–2031
 7. Schafer, H., Hach, A., Proetzsch, M., Berns, K.: 3d obstacle detection and avoidance in vegetated off-road terrain. (May 2008) 923–928
 8. Jean-Francois Lalonde, Nicolas Vandapel, D.H., Hebert, M. Natural terrain classification using three-dimensional ladar data for ground robot mobility **23**(1) (November 2006) 839 – 861
 9. Rasmussen, C.: Combining laser range, color, and texture cues for autonomous road following. *Robotics and Automation, 2002. Proceedings. ICRA '02. IEEE International Conference on* **4** (2002) 4320–4325 vol.4
 10. Weiss, C., Tamimi, H., Zell, A.: A combination of vision- and vibration-based terrain classification. (Sept. 2008) 2204–2209
 11. Kortenkamp, D., Bonasso, R., Murphy, R.: *AI-Based Mobile Robots: Case Studies of Successful Robot Systems*. MIT Press, Massachusetts, USA (1998)