

移動物体検知のための高速三次元距離情報取得システムの構築

Development of High-frequency 3D LIDAR for mobile robots to detect moving objects

大竹 一樹, 徳永 直木, 永谷 圭司, 吉田 和哉 (東北大)

Kazuki OTAKE, Naoki TOKUNAGA, Keiji NAGATANI, Kazuya YOSHIDA
Tohoku University, {otake, tokunaga, keiji, yoshida}@astro.mech.tohoku.ac.jp

In real dynamic environments, it has a big advantage for intelligent motions of service robots to recognize its surrounding 3D environment. Furthermore, detection of moving objects is additional important technology for improvement of robots' motion. Therefore, our research objective is set as a detection of moving objects based on 3D LIDAR (Light Detection And Ranging). Typically, 3D LIDAR scanning obtains very accurate environment data, however it takes a time. Therefore, in this research, we developed a high-frequency 3D LIDAR that has a function of variable rotational speed control. In the LIDAR system, the core sensor is Sokuiki sensor produced by HOKUYO AUTOMATIC CO. LTD., and it is rotated up to 3 rps on the rotational table. Using this sensor, moving object can be recognized by the calculus of difference between two adjacent 3D environment data, sequentially. Experimental results verified a validity of our approach in simple environments. In this paper, we explain our development of high-frequency 3D LIDAR, detection method of moving obstacles, and report experimental results of recognition about moving objects.

Key Words : 3D LIDAR , Moving objects

1 はじめに

近年, 家庭や病院など人間が生活する環境で作業を行うサービスロボットの研究開発が盛んに行われている. このような人間と共存するロボットには, 環境に応じた動作を実行するため様々な機能が要求される. その一つとして近年注目されているのが, 三次元環境認識である.

ロボットの三次元環境認識には, いくつかの手法があるが, 主な手法としてステレオカメラを用いたものと, 3D LIDAR(Light Detection And Ranging)を用いたものに大別される. ステレオカメラによる環境認識は広く用いられ, 多くの研究報告がなされているが, この手法では, 測定距離に応じて計測精度が低下する, 照明などの影響を受けやすいといった欠点がある. そこで本研究グループでは, これまで3D LIDARを用いた三次元環境認識に関する研究を進めてきた[1].

LIDARを用いた三次元環境認識では, 三次元環境を距離情報として詳細に取得できるという利点がある. しかしながら, この手法では, 三次元環境情報をデータ点の集合によって表現するため, 計測には時間が掛かるという欠点がある. 特に移動障害物を検知する場合には, 計測に時間が掛かると, 計測中に移動障害物の位置がずれてしまい, その位置を正確に把握できないといった問題が生じる.

そこで本研究では, 測域センサを用いて三次元環境計測を行い, 環境中から移動物体を検出するシステムの構築を研究目的に設定した. まず, 移動物体の三次元位置を高速に把握するため, 高速三次元スキャンが可能なスキャナの開発を行った. 三次元スキャナには, 水銀接点のロータリーコネクタを使用し, 測域センサを搭載したステージを無限回転可能とした. さらに周囲環境を高速スキャンするため, ステージ回転速度を最大180[rpm]に設定し, 高速スキャンを可能とした. ただし, 測域センサで得られるデータ量は一定であるため, 一回の三次元スキャンで得られる測距データ数は少なくなる.

次に, この開発したセンサを利用して移動物体を検知するため, 逐次獲得した三次元環境情報を時間方向に比較し, 差分処理を行うことで, 環境中から移動物体を検出する手法を開発した.

これまで, 測域センサを用いた移動障害物検知に関する研究は, いくつか行われてきた[2][3][4]. Carballoらは, 測域センサを用いて床からの高さが異なる二層の水平面を二次元スキャン



Fig. 1 3D LIDAR

し, 複数の人間の位置を推定する手法を提案した[2]. この手法では, 高速に人間の位置を推定できるが, 移動物体を三次元距離情報として計測することはできない. 大野らは, 測域センサから得た三次元環境情報中から, 移動物体によるエラーを除去する手法を提案した[4]. この手法では, 三次元環境中から移動物体を検出することができる. しかしながら, 本来の目的が静止障害物の切り出しであるため, 一回の三次元スキャンには, 5~20秒を要している. 本研究で提案する手法は, 大野らの手法と基本的に同じであるが, 高速に三次元スキャンを可能とする3D LIDARを利用し, リアルタイムで移動障害物を検知することを目的とする.

本稿ではまず, 開発した三次元スキャナの概要および性能評価実験について述べ, その後, 移動障害物検知手法および検証実験について述べる.

2 高速三次元スキャナの開発

2.1 三次元スキャナのハードウェア

三次元距離情報を取得する手法として, 二次元測域センサに一回転自由度を付加させることにより三次元的にスキャンを行うという手法が一般に広く用いられている. 本研究グループでも, これまでこの手法を用いた三次元スキャナの開発を行ってきた[5]. しかし, これまでに当研究室で開発してきた三次元スキャナは, 基本的に静的環境での使用を想定していたため, センサのヨー角周りに360度の三次元スキャンには, 8秒程度を要

するものであった．これでは，計測中に移動物体の位置が大幅に移動してしまうため，移動物体検知には適さない．そこで本研究では，移動物体検知のために新たな三次元スキャナを開発することとした．

図1に開発した三次元スキャナの概観を示す．本スキャナの特徴は，測域センサを搭載した回転ステージが無制限回転する点である．回転ステージとベースのデータ通信や電源供給には，水銀接点のロータリーコネクタを利用した．また，回転ステージの駆動モータについては，最大180[rpm]まで変更できるように選定した．これにより，三次元環境を高速にスキャンすることが可能となった．

測域センサには北陽電機社製のTOP-URGを用いた．TOP-URGは，最大30[m]の測距能力を有し，270[deg]の二次元平面内の物体までの距離を0.25[deg]刻みで測定する．二次元スキャンに要する時間は25[msec]であり，25[msec]毎に1081点分の測距データと同期信号を出力する．この同期信号をトリガーに回転ステージ角度を取得し，線形補間により各スキャン点におけるステージ角度を計算する．これにより，各測距データに対して座標変換を行うことで三次元環境を構築する．

ここで，測域センサの二次元スキャン周期と回転ステージの回転速度の関係について考える．回転ステージを N [rpm]で回転させた場合，ステージが一回転するのに要する時間は $60/N$ [s]である．これに対し，測域センサの二次元スキャンに要する時間は，25[msec]である．よって，ステージ一回転当たりに行われる二次元スキャン数 $s(N)$ は次のように求められる．

$$s(N) = \frac{60}{N} \frac{1}{25 \times 10^{-3}} \quad (1)$$

$N=60$ [rpm]， 120 [rpm]， 180 [rpm]の場合，それぞれ， $s(60)=40$ ， $s(120)=20$ ， $s(180)=40/3$ となる． 60 [rpm]の場合には，ステージ一回転毎に40回の二次元スキャンが行われる． 120 [rpm]の場合には，一回転毎に20回の二次元スキャンが行われ，スキャンラインの間隔は 60 [rpm]の二倍となる． 180 [rpm]の場合には，三回転毎に40回の二次元スキャンが行われる．つまり，一回転毎に位相がずれ，三回転ごとに同じ場所がスキャンされるため，結果としてスキャンライン間隔は 60 [rpm]と等しくなるという特徴がある．

2.2 三次元スキャナの評価実験

2.2.1 実験方法

開発した三次元スキャナの性能を評価するため，三次元距離情報取得実験を行った．図2(a)に示すように，スキャナから200[cm]の位置に一边100[cm]の正方形の板を垂直に立てて置き，ステージ回転速度を60[rpm]，120[rpm]，180[rpm]と変化させ，それぞれ計測を行った．座標軸は，スキャナを原点とし，板の方向に x 軸，鉛直上向きに z 軸，右手座標系となるように y 軸をとる．床から板までの距離は207[mm]であるため，板の位置は， $x=2000$ [mm]， $y=-500 \sim 500$ [mm]， $z=207 \sim 1207$ [mm]である(図2(b))．ただし，この位置については，メジャーによる測定であるため，2~3[cm]程度の誤差は生じる可能性がある．

板に対する計測点を2500点用いた場合と1万点用いた場合とで，次の3項目について評価を行った．

1.形状精度

本来1[m]×1[m]である板に対する計測精度を調べる．具体的には，板に対する計測点を各軸に投影し，各軸における計測点位置の最大値と最小値の差 Δx ， Δy ， Δz を測定し，計測点のばらつきを計測する．

2.位置精度

板に対する計測点の重心(x_G ， y_G ， z_G)を計算し，板の中心(2000，0，707)との距離 d_{G-C} を測定する．

$$d_{G-C} = \sqrt{(2000 - x_G)^2 + y_G^2 + (707 - z_G)^2} \quad (2)$$

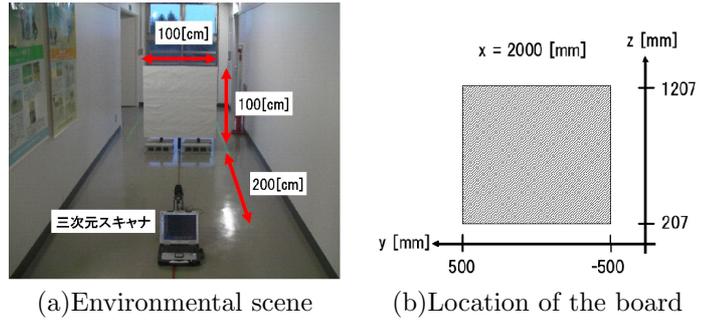


Fig. 2 Experimental setup of basic 3D scanning

なお，計測が理想的に行われた場合，この距離は0となる．

3.均一度

板に対する計測がどの程度均一に行われたかを調べる．計測点が1万点の場合，まず， yz 平面で，板がある1[m]×1[m]の領域に1[cm]×1[cm]のグリッドを割り当てる(このとき，グリッド数は，1万個となる)．次に，計測点を yz 平面に投影し，各グリッドに入った計測点数をカウントし，標準偏差 σ を計算する．計測点1万点に対し，グリッド数が1万個であるため，グリッド内の平均計測点数は1となり，均一に計測が行われた場合，標準偏差は0となる．なお，計測点が2500点の場合には，平均計測点数を1とするため，グリッドサイズを2[cm]×2[cm]とする(グリッド数:2500)．

2.2.2 実験結果および考察

図3に60[rpm]，120[rpm]，180[rpm]のそれぞれについて，計測点が2500点の場合と1万点の場合の板に対する計測部分を拡大した結果を示す．図中の黒い枠が板の位置を表し，その板に対する測定で得られた計測点を青で示した．また，表1に各評価指標の測定結果を示す．

スキャンラインの間隔について，図3を見ると，60[rpm]，180[rpm]よりも120[rpm]のほうが間隔が広がっている．しかし，スキャンラインの間隔は一定ではない．これは，二次元スキャン周期と回転速度の関係にズレが生じたためである．180[rpm]のときの測定結果が，最もまっぴんなくスキャンが行われており，表1の180[rpm]のときの σ からも，そのことは見て取れる．一方，120[rpm]では，スキャンラインが重なっている部分が多いため， σ が大きくなった．

形状精度については，表1の Δy ， Δz を見ると，一辺が1000[mm]の板に対し，計測点の広がりはおおよそ1100[mm]以内に収まっている．しかしながら， Δx を見ると，奥行き方向には最大で180[mm]も計測点が広がってしまった．これについては，板の端部分で，計測点が後方に回り込んでしまう現象によるものと考えられる．図4は，図3(b)を真上から見た様子である(紙面上向きが x 軸正方向)．このような回り込みによって奥行き方向に計測点が広がってしまったと考えられる．

位置精度については，表1から， d_{G-C} の値は，おおよそ3~4[cm]程度である．また， x_G はすべて1970[mm]付近に集中して

Table 1 Result of evaluation figure

	60[rpm]		120[rpm]		180[rpm]	
	2500点	1万点	2500点	1万点	2500点	1万点
Δx [mm]	116	117	145	180	146	150
Δy [mm]	1052	1061	1072	1089	1079	1085
Δz [mm]	1051	1056	1100	1100	1082	1094
x_G [mm]	1977	1974	1966	1966	1968	1967
y_G [mm]	42.6	-1.9	-3.9	1.5	-1.1	1.7
z_G [mm]	667	685	702	699	701	706
d_{G-C} [mm]	63	34	34	35	33	33
σ	1.234	0.971	1.597	1.140	1.213	0.969

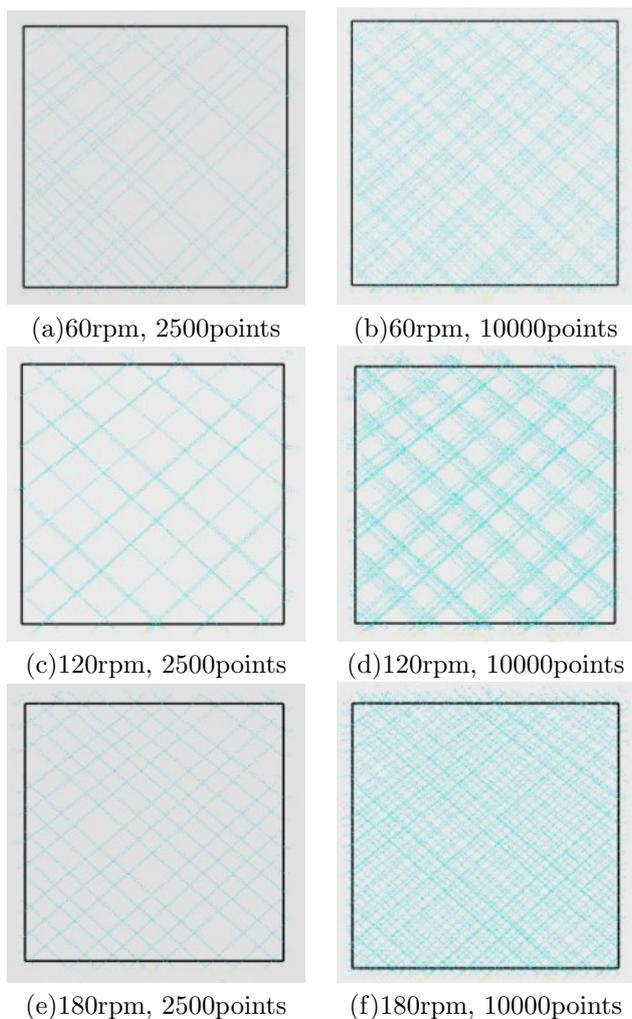


Fig. 3 Result of 3D scan

おり、これは、スキャナと板との距離をメジャーで測定した際に誤差が生じ、実際の板の位置が $x=1970[\text{mm}]$ 付近であったためと考えられる。一方、(60[rpm], 2500点)の場合は、参照する計測点数が少なかったため、計測点分布にムラがあり、重心位置が中心から離れてしまったと考えられる。

以上の結果より、開発した三次元スキャナは2[m]離れた物体に対して10[cm]程度の誤差で計測でき、移動物体の三次元位置を計測するスキャナとしては十分な精度であると考えられる。また、スキャナの回転速度を適切に設定することができれば、ムラのない三次元情報を獲得可能である。

3 移動障害物の検出

移動障害物の位置は、時間の経過とともに変動する。そこで本研究では、前章に示した高速三次元スキャナにより逐次獲得した三次元距離情報を時間方向に比較し、差分処理を行うことで、獲得した三次元環境情報から移動障害物を抽出することとした。以下に、提案する移動障害物検知手法の具体的な手順を説明する。

3.1 voxel形式への変換

一般に、測域センサを用いて獲得した三次元距離情報は、図5(b)に示すように点の集合(以下、ポイントクラウドと呼ぶ)で表現される。図5(b)は、図5(a)に示す環境で、回転速度を120[rpm]として5秒間スキャンを行った結果である。ポイントクラウドの場合、物体の形状を細かく表現できるが、同じ物



Fig. 4 Top view of the board

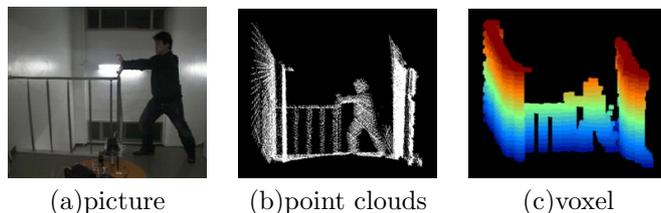


Fig. 5 Example

体に対しても毎回同一ポイントが計測されるわけではないため、三次元情報の比較を行うことは困難である。そこで本研究では、これをvoxel形式に変換した後に、差分処理を行うこととした。このvoxel形式は、三次元形状を均一な大きさの直方体(voxel)の集まりで表現するものである。図5(c)は図5(b)を10[cm]×10[cm]×10[cm]のvoxelを用いて環境を表現したものである。なお、図では高さにより色を変えている。

3.2 移動voxelの検出手法

三次元スキャンにより獲得したスキャンデータをvoxel形式に変換した後、時間方向に差分処理を行うことで、各voxelが移動物体を構成するvoxel(移動voxel)か、静止物体を構成するvoxel(静止voxel)かを識別する。これにより、三次元環境において静止物体と移動物体を識別することができる。以下に具体的な手順を示す。

n 回目の三次元スキャンで得られたvoxelの集合を $V(n)$ とする。 $V(n)$ は、各voxelに対する計測情報 $v_{x,y,z}(n)$ から成る。 $v_{x,y,z}(n)$ は、論理型の変数であり、位置 (x, y, z) のvoxelに対して、計測が行われていれば $v_{x,y,z}(n) = true$ 、行われていなければ $v_{x,y,z}(n) = false$ で表現される。

$V(n)$ に対して過去 m 回分のスキャンデータを用いて移動voxelの検出を行う場合、 $v_{x,y,z}(n) = true$ のvoxelに対し、 $v_{x,y,z}(n-1)$ 、 $v_{x,y,z}(n-2)$ 、 \dots 、 $v_{x,y,z}(n-m)$ を参照し、それらがすべて $false$ ならば移動voxel、一つでも $true$ があれば静止voxelとする。つまり、過去 m 回分の三次元スキャンで一度でも計測が行われていれば静止voxel、一度も計測が行われていなければ移動voxelと判断する。これは、 m が小さい場合、移動物体のオクルージョンにより計測されなかった静止voxelが、移動voxelとして誤検出されてしまうのを防ぐためである。 m を適切に設定することで、移動物体にオクルードされる前の静止voxelが有効となるため、静止voxelをロバストに識別することが可能となる。

3.3 移動障害物検知実験と考察

前節で提案した移動障害物検知手法の有用性を検証するため、人間が廊下を歩いている環境で三次元計測を行い、移動障害物検知実験を行った。

図6(a)に示すように廊下に三次元スキャナを設置し、前方から人間が歩いてくるという状況で、三次元スキャナの回転速度を60[rpm]、120[rpm]、180[rpm]と変化させ、移動物体と静止物体をどの程度の割合で識別できるのかを測定した。比較する過去のスキャンデータ数 m は、60[rpm]のとき $m=3$ 、120[rpm]のとき

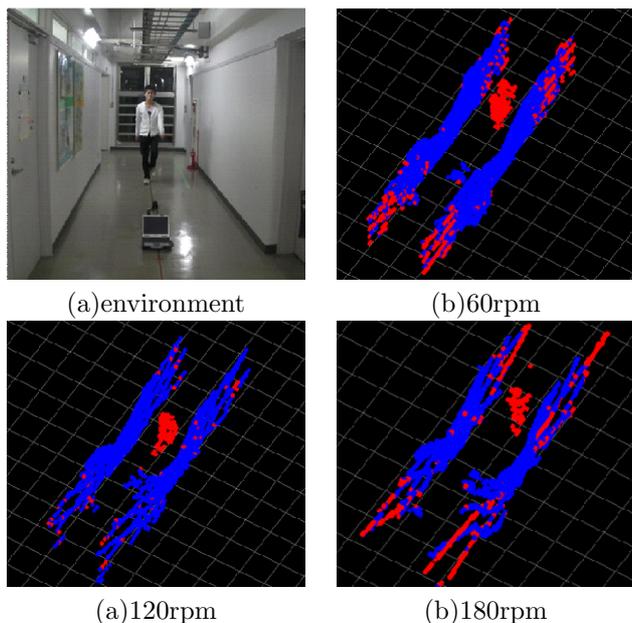


Fig. 6 Experiment for detection of moving object

Table 2 Identification rate

rotation speed	static object	moving object
60[rpm]	88.3[%]	100[%]
120[rpm]	96.3[%]	100[%]
180[rpm]	82.3[%]	100[%]

$m=6$, 180[rpm]のとき $m=9$ とし、全てにおいて過去3秒分のデータを用いることとした。なお、voxelの大きさは $10[\text{cm}] \times 10[\text{cm}] \times 10[\text{cm}]$ 、測定範囲は幅 $10[\text{m}] \times$ 奥行き $10[\text{m}] \times$ 高さ $2[\text{m}]$ とした。

図6(b), (c), (d)は60[rpm], 120[rpm], 180[rpm]に対する実験結果である。青い部分は静止voxel, 赤い部分は移動voxelを表す。また, (b), (c), (d)の移動障害物および静止障害物の識別率を表2に示す。なお, ここで識別率とは, 本来移動(静止)voxelであると考えられるvoxelの中で, 本手法により移動(静止)voxelと正しく識別されたvoxelの割合である。(b), (c), (d)ともに移動障害物の識別率は100%, 静止障害物の識別率は80%以上であり, このような単純な環境では, 本手法は有用であると考えられる。

一方, 図6(b), (d)から60[rpm]と180[rpm]の場合には, スキャナからの距離が遠い部分で静止障害物の識別率が低下していることがわかる。本手法は, 静止物体に対しては毎回同じvoxelが計測されるという前提で識別を行っているが, スキャナからの距離が遠くなると計測点の密度が低下する。これにより, 毎回同じvoxelを計測する確率が低くなるため, 識別率が低下したと考えられる。よって, スキャナからの距離に応じてvoxelのサイズを変化させることで識別率を向上させることができると考えられる。

これに対し, 120[rpm]では, 静止障害物を約96%の割合で識別できている。図7は(b), (c), (d)の壁の一部を拡大したもので, 3秒間分のポイントクラウドデータを表示したものである。60[rpm], 180[rpm]ではまんべんなくスキャンが行われているのに対し, 120[rpm]の場合にはスキャンラインが重なっており, スキャンラインの間隔が広い。このことから, 60[rpm], 180[rpm]では毎回異なるラインでスキャンが行われたのに対し, 120[rpm]では, 毎回同じラインでスキャンが行われたことがわかる。これにより, スキャナからの距離が遠い部分でも毎回同じvoxelがスキャンされ, 識別率が向上したと考えられる。

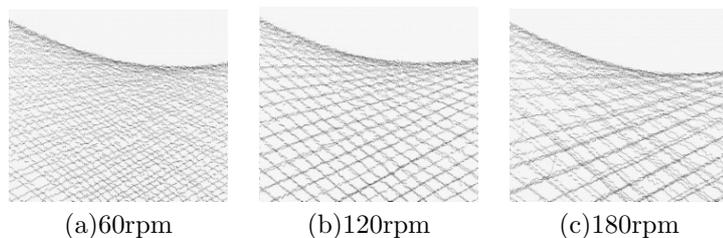


Fig. 7 Closeup of wall

4 おわりに

本研究では, 周囲の三次元環境を高速スキャン可能な三次元スキャナを開発した。スキャナの回転部は無限回転が可能であり, 最大回転速度は180[rpm]である。また, 三次元距離情報取得実験を行い, 計測の形状精度, 位置精度, 均一度についてスキャナの性能を評価した。さらに, 逐次獲得した三次元距離情報を時間方向に比較し, 差分処理を行うことで環境中から移動障害物を検知する手法を提案した。提案手法では, 取得データをvoxel形式で表現した後にデータの比較を行い, voxelごとに移動であるか静止であるかを識別した。最後に, 提案手法を用いて検証実験を行い, 単純な環境において, 高い割合で移動障害物を検知できることを確認した。

今後の課題として, 移動障害物の検知率を向上させることが挙げられる。そのためには, 計測距離に応じてvoxelのサイズを変化させることが必要である。また, 各voxelに対してラベリング処理を行い, 隣接するvoxel群を一つの物体として考えることで, 物体ごとに移動か静止かを判別することができると考えられる。

参考文献

- [1] Keiji NAGATANI, Takayuki Matsuzawa, and Kazuya Yoshida. Scan-point Planning and 3-D Map Building for a 3-D Laser Range Scanner in an Outdoor Environment. Preprints of the 7th International Conference on Field and Service Robotics, CDROM(2009-07).
- [2] Alexander Carballo, Akihisa Ohya and Shin'ichi Yuta. Fusion of Double Layered Multiple Laser Range Finders for People Detection from a Mobile Robot. In proceedings of IEEE international Conference on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems, pages pp.677-682, 2008.
- [3] Jae Hoon Lee, Takeshi Tsubouchi, Kenjiro Yamamoto and Saku Egawa. People Tracking Using a Robot in Motion with Laser Range Finder. In proceedings of the 2006 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pages pp.2936-2942, 2006.
- [4] Kazunori Ohno, Toyokazu Kawahara and Satoshi Tadokoro. Development of 3D Laser Scanner for Measuring Uniform and Dense 3D Shapes of Static Objects in Dynamic Environment. In proceedings of the 2008 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, pages pp.2161-2167, 2009.
- [5] Keiji NAGATANI, Naoki TOKUNAGA, Yoshito OKADA and Kazuya YOSHIDA. Continuous Acquisition of Three-Dimensional Environment Information for Tracked Vehicles on Uneven Terrain. In proceedings of the 2008 IEEE International Workshop on Safety, Security and Rescue Robotics, pages pp.25-30, 2008.