

# 車輪型倒立振子ロボットのための周辺環境の地図生成

～ データ取得時刻の補正による地図精度の向上 ～

## Mapping of surrounding environment for a wheeled inverted Pendulum type robot

～ Improvement of map accuracy by data acquisition timing compensation ～

野上和幹\* , カニエテ ルイス\* , 高橋隆行\*

Kazuki Nogami\* , Canete Luis\* , Takayuki Takahashi\* ,

\*福島大学

\*Fukushima University

キーワード : 人支援ロボット (human support robot) , レーザレンジファインダ (laser range finder) ,  
占有格子地図 (occupancy grid map) , マッピング (mapping)

連絡先 : 〒 960-1248 福島市金谷川 1 番地 福島大学 理工学群 共生システム理工学類 高橋隆行研究室  
野上和幹 , Tel./Fax.: (024)548-5259 , E-mail: kazu@rb.sss.fukushima-u.ac.jp

### 1. 緒言

近年, 人間の生活環境において対人サービスを提供する人支援ロボットの開発が盛んに行われている。人支援ロボットは, 人や生活環境に危害を加えない高安全性と多種多様なタスクをこなす高作業性が求められている。しかし, これらは一般的にトレードオフの関係にあり, 高安全性と高作業性を両立したロボットの開発は困難である。この課題に対し筆者らは, 車輪型倒立振子機構のメリットを積極的に利用することで, サービスを効率よく提供することを目的とした人支援ロボット「I-PENTAR(Inverted PENDulum Type Assistant Robot)」を開発している<sup>1)</sup>。I-PENTAR のハードウェアの外観と仕様をそれぞれ Fig. 1 , Table 1 に示す。I-PENTAR は, 軽

量で低トルクなマニピュレータを用いることで安全性を向上させている。さらに, 本体を傾けることで重心移動させ, 自重を有効に利用することで, 低トルクなマニピュレータでも重量物の持ち上げや運搬作業が可能である。また, 移動機構は対向二輪型であるため, 三輪以上のロボットと比較して同フットプリント内の車輪径を大きくでき, 段差踏破能力を高めやすい。I-PENTAR は, 7.5[kg] 程度の持ち上げ, スロープ上での台車の Pushing-Pulling タスク, 25[mm] 程度の段差乗り越え動作などを実現している<sup>2)</sup>。

人支援ロボットが人間の生活環境において周辺環境を認識するためには, ロボットの自己位置と周辺の地図情報が必要であり, 地図情報が与えられていない場合には地図生成を行う必要がある。この地図生成と自己位置推定を同時に行う

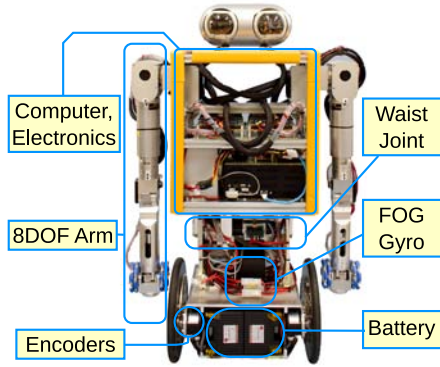


Fig.1: I-PENTAR

Table 1: Hardware specification of I-PENTAR

Size	0.9 [H] × 0.3 [W] × 0.2 [D] [m]
Weight	40 [kg]
DOF	Mobile Base(2), Manipulator(8×2), Waist(1)
Sensor	Gyro sensor(2), Encoder(19)

ことを SLAM(Simultaneous Localization and Mapping) という<sup>4)</sup>。

ロボットの地図生成に用いられる主なセンサとして、レーザ光を用いた LRF(レーザレンジファインダ) が挙げられる。LRF は、音を用いて距離を測る超音波センサと比べて距離精度が高い。また、ステレオカメラなどの視覚センサと比較して、特別なデータ処理をせずとも距離情報が直接得られるなどの利点がある。多くの LRF は二次元平面を走査し、その平面上での距離を測定するため、走査平面上にかからない障害物を測定することができない。しかし近年、三次元空間を測定できる LRF の開発が進み、それらを用いることで複雑な環境に対応できる三次元地図の生成が可能となった<sup>3)5)6)</sup>。本研究では、より精度の高い地図生成の実現について検討する。

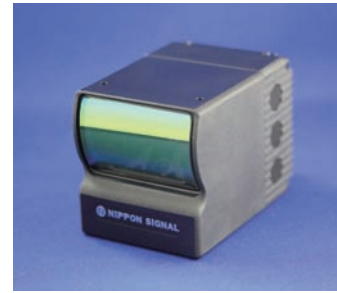


Fig.2: InfiniSoleil FX8(NIPPON SIGNAL)

Table 2: Specification of Laser Ranging Image Sensor InfiniSoleil FX8

方式	Time-of-flight	
検出距離範囲	0 ~ 15 [m]	
画角	水平	60 [deg]
	垂直	50 [deg]
応答速度	10 [f/s]	
測距点数	65×39	
距離分解能	Min.4 [mm]	
距離精度	0.3 ~ 5 [m] (Ta:25 [°C])	
耐外乱光	200,000 [lx] 以上	
外形寸法	W 62 × H 66 × D 89 [mm]	
質量	約 0.5 [kg]	
動作温度	-10 [°C] ~ +50 [°C]	

## 2. 地図生成

本研究は、地図生成に三次元距離センサ InfiniSoleil FX8(日本信号) を用いる。FX8 の外観を Fig. 2 に、仕様を Table 2 に示す。また、本稿では地図の表現方法として占有格子地図を用いる。占有格子地図は、測定する周辺環境を格子状に細かく区切り、地図を表現したものである。各格子(以後セルと呼ぶ)には“占有確率”と呼ばれる変数が割り当てられており、その値が大きくなるほどそのセルに相当する位置には何らかの物体(障害物)が存在することを示している。その占有確率により、障害物が存在する空間を占有空間、障害物のない空間を自由空間、占有確率が曖昧な値をとる場合や障害物の後ろなどセンサで測定できない空間を未知空間と定

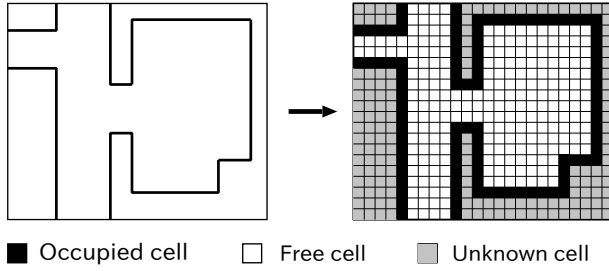


Fig.3: Occupancy grid map

義し，占有確率の値を適当な閾値で3値化することで判定する．Fig. 3 に占有格子地図の例を示す．黒色のセルは占有空間，白色のセルは自由空間，灰色のセルは未知空間をそれぞれ表現している．Fig. 3 では平面の占有格子地図を示したが，本研究で用いるセンサは三次元情報を取得できるため地図を三次元に拡張することも可能である．しかし，その場合には計算コストが大幅に上昇するため，リアルタイムで処理する場合には処理速度などに注意する必要がある．本論文では，Thrun らの占有格子地図のアルゴリズム<sup>4)</sup>を用いる．このアルゴリズムを以下に示す．

時刻  $[1:t]$  のロボットの位置 (経路) 情報  $x_{1:t}$  と距離センサの測定データ  $z_{1:t}$  を用いて各セル  $m_i$  の占有確率  $p(m_i|z_{1:t}, x_{1:t})$  を計算する．時刻  $t$  の時，任意のセル  $m_i$  の占有確率  $p(m_i|z_{1:t}, x_{1:t})$  は式 (1)，式 (2) を用いて計算することができる．

$$l_{t,i} = l_{t-1,i} + L_{x,z} - l_0 \quad (1)$$

$$p(m_i|z_{1:t}, x_{1:t}) = 1 - \frac{1}{1 + \exp\{l_{t,i}\}} \quad (2)$$

$l_{t,i}$  は時刻  $t$  におけるセル  $m_i$  の占有確率であり， $l_0$  はセル  $m$  の初期値である． $L_{x,z}$  には，ロボットの位置  $x$  とセンサの測定データ  $z$  が得られた場合の各セルの状態を，セルにレーザー光が当たった場合，透過した場合，その他の3つに分類し，対応した値  $l_{\text{occ}} > 0$ ， $l_{\text{free}} < 0$ ， $0$  を代入する．

上記の計算を逐次行い，各セル  $m_i$  の占有確率  $p(m_i|z_{1:t}, x_{1:t})$  を更新する．本論文では  $l_{\text{occ}} = 1$ ， $l_{\text{free}} = -1$ ，セルの大きさを一辺  $50[\text{mm}]$  の条件

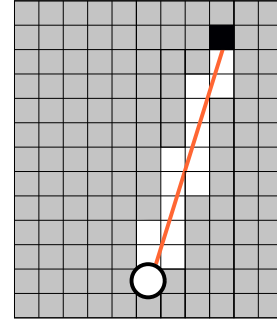


Fig.4: Probability update when using the FX8

にて地図生成を行う．また，それぞれの占有確率の閾値は以下のように定めた．

$$\text{占有空間} : 0.9 < l \leq 1.0 \quad (3)$$

$$\text{未知空間} : 0.3 \leq l \leq 0.9 \quad (4)$$

$$\text{自由空間} : 0.0 \leq l < 0.3 \quad (5)$$

### 3. センサの時刻同期

現在，検討している I-PENTAR と FX8，オドメトリのデータのやりとりの流れを Fig. 5 に示す．まず，ロボットから FX8 にスタート信号を送り，FX8 からロボットに開始のレスポンスが返される．それ以降，FX8 は継続的に計測を行い，取得した点群座標データ (以後点群データと呼ぶ) をフレーム毎にロボットへ送信する．ロボットは点群データの受信を確認すると，オドメトリによる自己位置情報をリクエストする信号を送信し，自己位置情報を取得する．この動作を繰り返し行う．しかし，このデータのやり取りでは点群データと自己位置情報の取得時刻に時間差  $\Delta t$  が生じ，誤差の要因になる．したがって，各センサから得られるデータの取得時刻を合わせる必要がある．そこでまず，この時間差  $\Delta t$  の推定手法を提案し，実際に時間差がどのくらい生じるのか確認する．

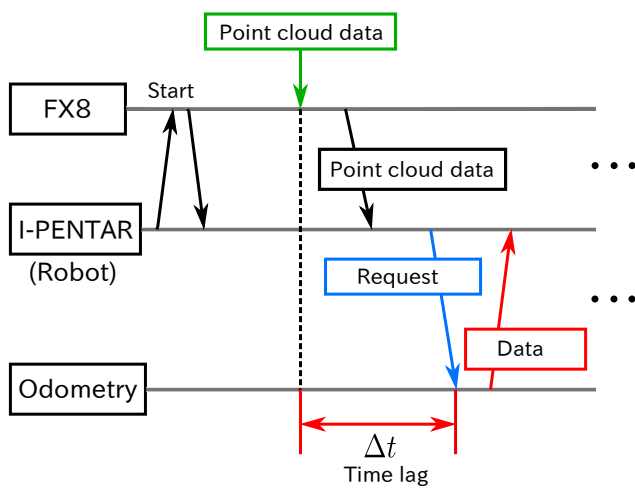
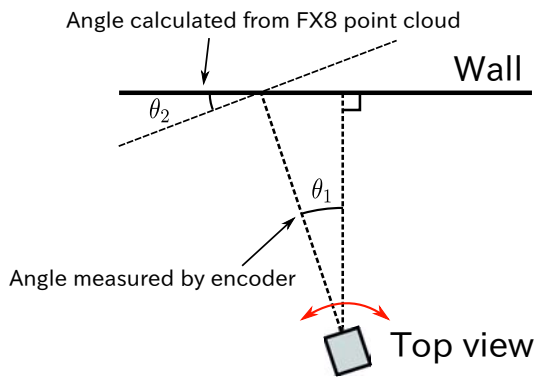


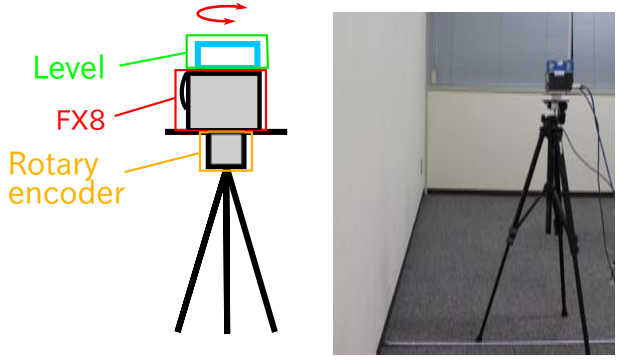
Fig.5: Flow of data communication

### 3.1 時間差の推定手法

時間差  $\Delta t$  の推定方法について述べる．本論文の手法では，Fig. 5 の “Odometry” のところにロータリエンコーダを用いる．Fig 6 に示すように，三脚にロータリエンコーダを固定し，FX8 を平坦な壁面に向かって正対させた状態を  $0[\text{deg}]$  として，左右に回転させる．その時の FX8 の回転角度  $\theta_1$  をロータリエンコーダを用いて取得する．また，壁面と FX8 から得られる点群データの相対角度  $\theta_2$  を求める． $\theta_2$  を求めるためには，壁面との相対角度をみるため，点群データから平面を算出しなければならない．そのための手法として，最小二乗法を用いる．時間差の無い理想的な場合には， $\theta_1 = \theta_2$  となるが，時間差が生じている場合には，角度と時間を軸にとったグラフを重ねた場合に時間方向のズレが生じる．この  $\theta_1$  と  $\theta_2$  の間で相関をとることで時間差の推定を行う．



(a) Method for calculating data time lag



(b) Actual apparatus for measuring time lag

Fig.6: Estimation of the time lag

### 3.2 予備実験

まず，FX8 を回転させずに固定した状態で点群データを取得し，それを用いて最小二乗法により平面を求めた．FX8 と PC の通信にはイーサネットを使用した．また， $\theta_1$  はロータリエンコーダ OEZ-05-2M(500[P/R]) の出力をマイクロコンピュータボード RX621(秋月電子通商株式会社) を用いて計測し，シリアル通信にて PC と通信する．シリアル通信のボーレートは  $57400[\text{baud}]$  とした． $-30 \sim 30[\text{deg}]$  の範囲を  $10[\text{deg}]$  間隔で測定した時の  $\theta_1, \theta_2$  の値は Fig. 7 のようになった．点群データから算出している  $\theta_2$  は安定した値を示しており，この手法による推定は有効であると考えられる．また， $\theta_2$  は  $\theta_1$  と比較して，わずかに絶対値の大きな値をとる傾向があった．

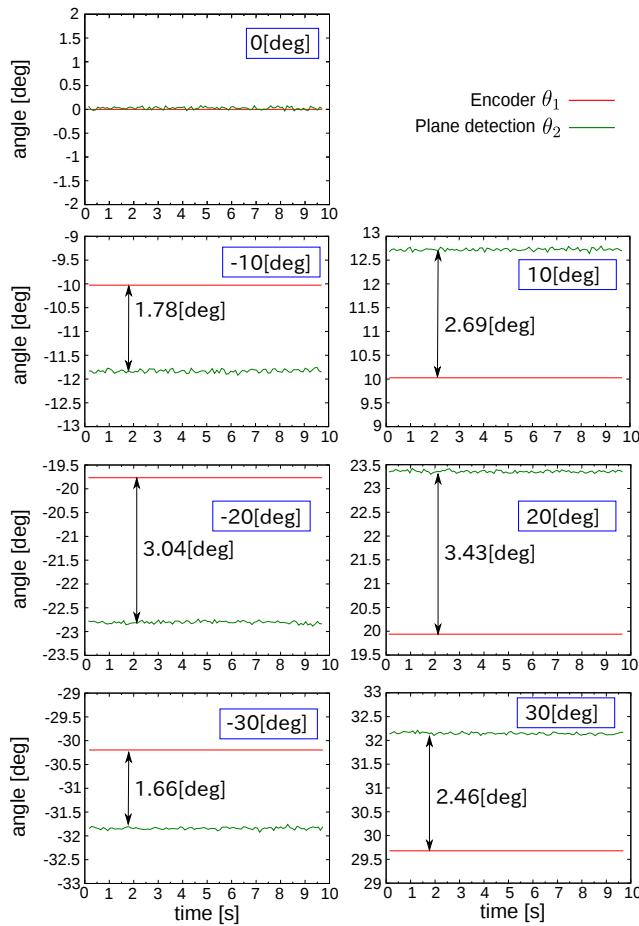


Fig.7: Comparison of measured angle from the encoder and calculated angle from point cloud data

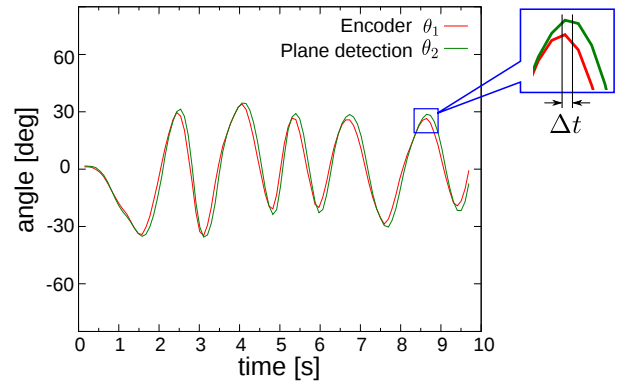


Fig.8: Experimental result

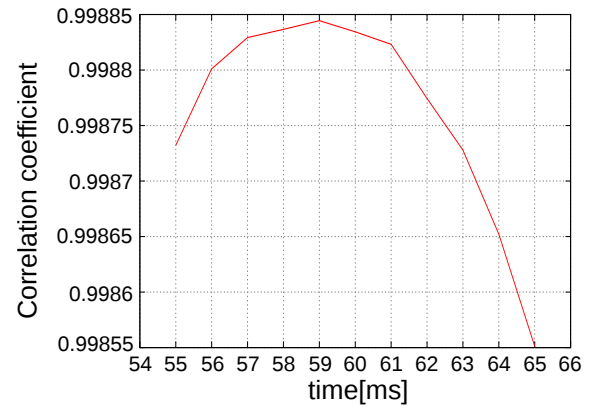


Fig.9: Correlation coefficient

### 3.3 実験

FX8を手動でYaw方向に回転させ、点群データを100フレーム測定した。また、Roll、Pitch方向に関しては、傾きをゼロに調整するために水平器を用いた。結果をFig.8に示す。FX8の点群データから算出した角度 $\theta_2$ がエンコーダの角度 $\theta_1$ に比べてわずかに遅れていることがわかる。これらのデータに対して相関をとったところ、Fig.9に示すように59[ms]の時間差が確認できた。また、FX8の各フレーム毎の点群データ(2535点)とその時のエンコーダの角度 $\theta_1$ から求めた平面との距離の標準偏差(以後バラつきと呼ぶ)を用いて比較したところ、Fig.10のように59[ms]の補正によりバラつきが抑えられていることが確認できた。したがって、この時

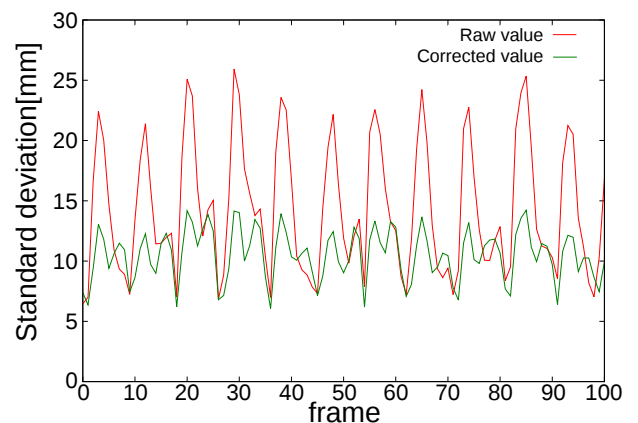


Fig.10: Comparison of standard deviation of distance between point cloud and plane

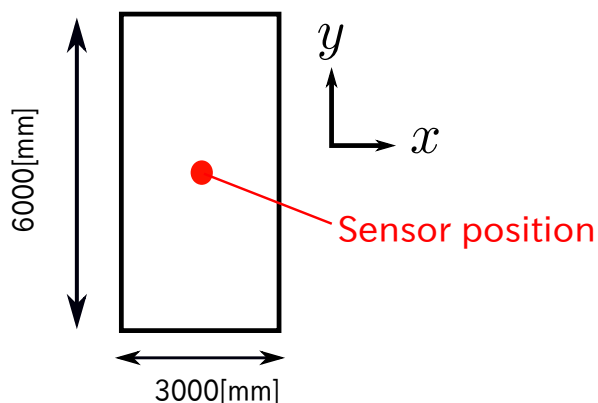


Fig.11: Simulated space

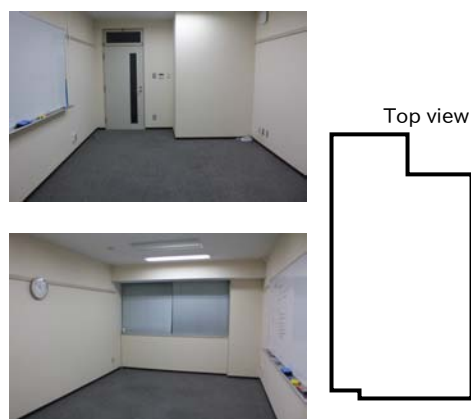


Fig.13: Indoor environment to be mapped

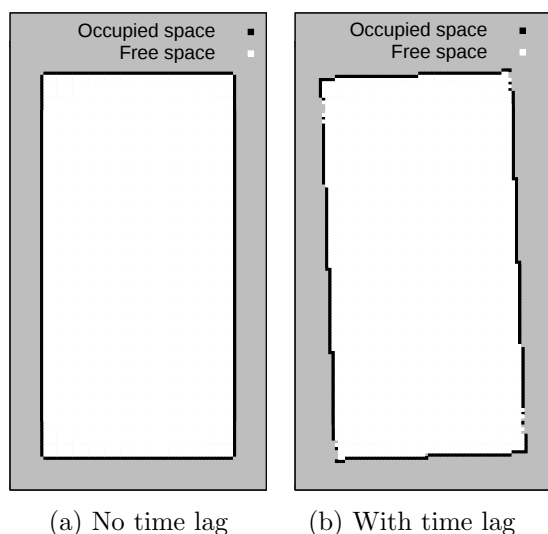


Fig.12: Comparison of 2D occupancy grid map using simulation values

間差を補正することで、より正確な測定をすることができると考えられる。

#### 4. 時間差による影響の検証

第3.3節にて確認した時間差 59[ms] が地図生成において、どれほど影響するのかについて検証を行う。

##### 4.1 シミュレーションによる検証

時間差 59[ms] が地図生成に与える影響を、まずシミュレーションにより検証した。Fig. 11 に示すような、縦 6000[mm]、横 3000[mm]、床と

天井が無限遠にあるような仮想的な空間にてシミュレーションを行った。その空間の中心に理想的な計測を行う FX8 を置き、36[deg/s] の速度で回転させ測定を行うものとする。この理想的な FX8 から得られるデータを用いて格子の大きさを 50[mm] として生成した地図を Fig. 12 に示す。地図が回転方向に歪んでいることが確認できた。また、地図が占有格子で囲まれておらず、壁面に曖昧なところが現れた。

##### 4.2 実測データを用いた検証

時間差 59[ms] が地図生成に与える影響を実測データを用いて検証した。第3.3節の実験と同様に三脚にロータリエンコーダを取り付けた FX8 を用いた。Fig. 13 に示す屋内環境にて、Fig. 14 のように、測定する屋内環境の中心に FX8 を置き、ロータリエンコーダの角度情報を元に時間差補正の有無それぞれ場合に対して地図生成を行った。Fig. 15 のように、補正をかけることで回転方向への歪みを抑え、壁面の曖昧なところ(占有空間の無いところ)を減少させることが確認できた。これは、占有確率の更新が補正前と比べてより正しい位置にて占有確率の更新が行われたためだと考えられる。



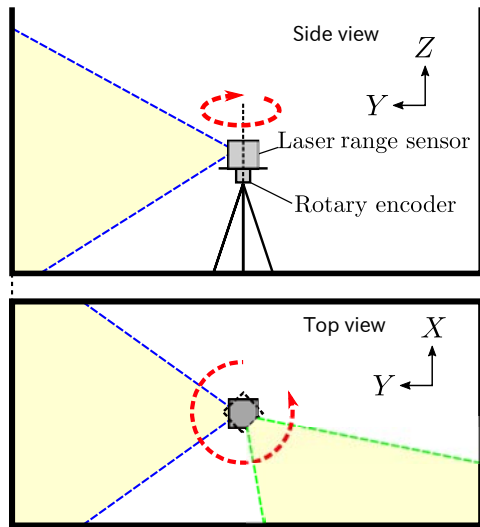


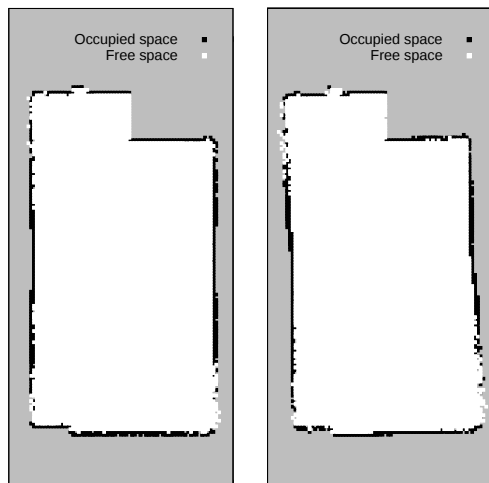
Fig.14: Experiment for testing the time-lag compensation



Fig.16: Indoor environment to be mapped

### 4.3 移動台車を用いた地図生成

移動台車にて、FX8 を実際に移動させて実験を行った。自己位置推定に台車の車輪に取り付けた2個のエンコーダによるオドメトリを用いて地図生成を行う。実験環境を Fig. 16 に、FX8 を取り付けた移動台車とブロック図を Fig. 17 示す。通信方法は第3.2節と同じものを用いる。この移動台車を用いて Fig. 18 に示すような経路で移動しながら地図生成を行った。結果を Fig. 19 に示す。第4.2節の結果と同様の効果が確認できた。



(a) With compensation (b) No compensation

Fig.15: Comparison of 2D occupancy grid map using measured values

## 5. 結言

本論文では、人支援ロボットの周辺環境認識のための三次元距離画像センサを用いたデータ取得時刻の補正による占有格子地図の精度の向上について述べた。ロボットには多くのセンサが用いられているが、そのセンサ同士のデータの取得時間に差があることを確認し、相関をとることでその時間差を算出した。また、算出した時間差を用いて補正をかけることで地図の回転方向への歪みが抑えられ、壁面の占有確率が曖昧なところを減少させることをシミュレーション及び、実測データから確認した。

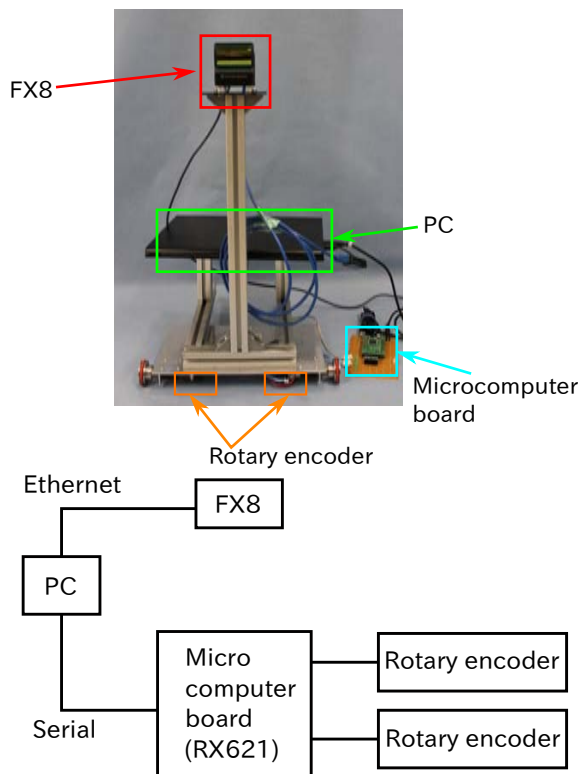


Fig.17: Wheeled platform for mapping test

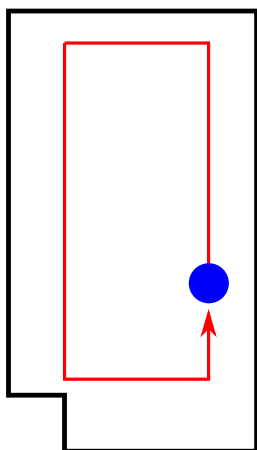


Fig.18: Path of wheeled platform

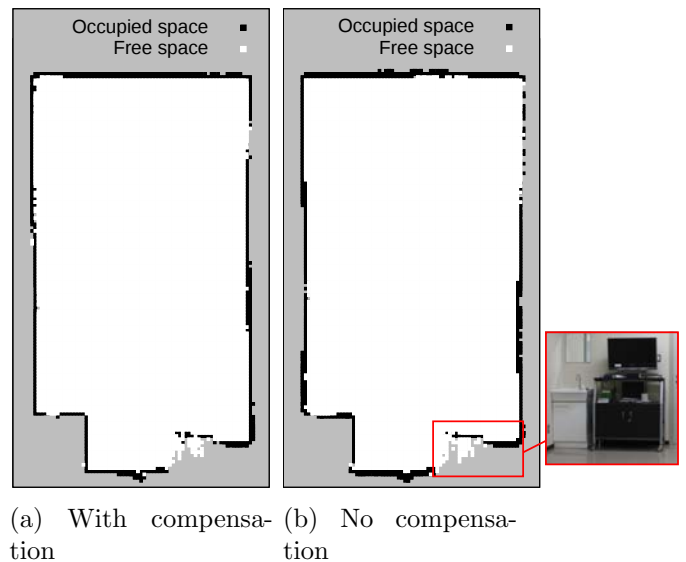


Fig.19: Comparison of 2D occupancy grid map using measured values

今後は、客観的な評価のために、生成した地図の評価方法の検討を行う。また、障害物の多い環境での地図生成、累積誤差の少ない自己位置推定手法の適用を行う。

## 参考文献

- 1) 近藤修平, Luis CANETE, 高橋隆行: マニピュレータを搭載した車輪型倒立振り子ロボットの制御 拡張状態オブザーバを用いたマニピュレータによる物体受け渡し制御, ロボティクスメカトロニクス講演会 2015, 1P2-G03 (2015)
- 2) Luis CANETE, Takayuki TAKAHASHI: Pushing, Pulling, and Lifting Control of a Wheeled Inverted Pendulum Robot with Disturbance Compensation, ロボティクスメカトロニクス講演会 2012, 2A2-M04, (2012)
- 3) 大野和則, 竹内栄二郎, 坪内孝司: 投光型距離センサを用いた三次元 SLAM, 日本ロボット学会誌 Vol.26 No.4 pp306-309, (2008)
- 4) Sebastian Thrun, Wolfram Burgard, and Dieter Fox: Probabilistic Robotics, The MIT Press, (2005)
- 5) 酒井貴大, 三浦純: 移動ロボットによる屋外広域 3次元地図の生成, ロボティクスメカトロニクス講演会 2015, 2A1-U09, (2015)
- 6) 蔵町遼, 大里章人, 佐々木洋子, 溝口博, 加賀美聡: ICP アルゴリズムと 3 軸慣性情報を用いた位置・姿勢変化に頑健な 3次元地図生成, ロボティクスメカトロニクス講演会 2015, 2A2-M02, (2015)