

# 人共存環境における自律移動ロボットのための空間の使用履歴に基づく マルチレゾリューションマップの提案

## Human Activity Based Multi-Resolution Map for Autonomous Robot Navigation in Dynamic Environments

精密工学専攻 44号 古山敏也

Toshiya Furuyama

### 1. はじめに

これまでロボットは、工場のような人との関わりが制限された環境において組立や加工などの人の作業の代替をする産業用のロボットが主流であった。近年ではロボットが家庭や商業施設等の人の生活する環境において生活・活動支援を目的とした人とロボットの協調動作や共存を行う生活支援ロボット<sup>(1)(2)</sup>が求められている。生活支援ロボットの設計要件は不特定多数の人間が様々な条件下で混在する空間において、人に危険を与えない安全性、人の活動の妨げにならない予測性が求められる。

人との共存を想定した生活支援ロボットには外部より逐一指示されることなく自律的に移動する機能が必要となる。自律移動のための要素技術には環境地図と自己位置推定、経路計画、障害物回避があり、これらを統合する必要がある。環境地図は、センシング等の入力により周囲の環境情報を取得しロボットが認識可能な形に表現したものである。その情報を元にロボットの経路計画や障害物回避などの動作計画を行う。本研究では、人共存環境に適した移動ロボットの自律移動機能を実現させるための環境地図構築に着目する。

自律移動ロボットのナビゲーションのための環境地図として、経路計画に応用しやすいグリッドマップが広く用いられる。これは、環境を均一な大きさの格子状のセルに分割し、各セル障害物の有無などの情報を付加したものであり、代表的な環境地図として知られる。このグリッドマップについて二つの観点から考察する。

はじめに、地図の表現について考察する。グリッドマップの表現精度はセルのサイズで決まる。物体の位置を正確に表現するためにはセルのサイズが小さい高解像度な地図が望ましい。しかし、経路生成時に高解像度な地図を用いた場合、計算量が増大する。すなわち、環境地図の解像度の表現精度と経路生成時の計算コストはトレード・オフの関係であるといえる。この課題の解決のために部分的に解像度を変更するマルチレゾリューションマップが知られている。マルチレゾリューションマップの構築手法として、物体の位置情報に基づきクアッドツリーアルゴリズムを適用し解像度を変更する構築法<sup>(3)(4)</sup>や環境計測を行うロボットの周辺は計測精度が高いのでロボットから距離に応じて解像度を変更する手法<sup>(5)</sup>がある。また、解像度の異なる複数枚のグリッドマップを用意し、自己位置推定や経路計画などの用途に応じて適切なグリッドマップを選択し利用する方法<sup>(6)</sup>などのアプローチによって研究が行われている。しかし、これらの手法は人の空間の使い方を考慮せずに構築されるため、移動ロボットの動作効率が良いが人との共存環境における利用に適しているとはいえない。

つぎに、人共存環境に適応した環境地図について考察する。人との共存を実現するためには、人間に対して危険を与えないことが重要である。人の存在する環境で安全なナビゲーションを実現させる関連研究を挙げる。佐々木ら<sup>(7)</sup>の研究では人の歩行をトラッキングし、移動ロボットの経路計画に利用する。これは出入口や停止点などを含んだ人の歩行軌跡により移動ロボットの経路計画を行う。また、Florianら<sup>(8)</sup>の研究で

は人の位置から移動する可能性ある領域を危険領域として環境地図に記述する。これをリスクマップとして移動ロボットの経路計画に用いることで人の存在する環境にて安全なナビゲーションを実現する。しかし、人の行動を観測することを通じてこれらの情報を記述しているが、地図の表現効率に関しては考慮していない。すなわち、地図の表現と人との共存の二つの点について両立していない。本研究では人共存環境にて安全かつ効率的な動作が可能な自律移動ロボットナビゲーションを実現することを目的とする。そこで人が空間をどのように使用しているかを観測する。そして環境地図の表現効率のために、その空間の使用履歴により環境地図の場所ごとの解像度を決定する。例えば、人がよく使う領域は重要な空間ととらえ高解像度に表現する。障害物もなく、あまり使わない領域は重要でない空間と捉え低解像度に表現する。これにより地図の表現の効率性を上げることができる。このような空間の使用履歴に基づき空間の解像度を決定するマルチレゾリューションマップを提案する。

提案手法の環境地図により、動作計画は高解像度の領域において細かい動作、低解像度の領域においては、おおまかに動作する経路となる。さらに、解像度に応じて走行速度を変化させることにより動作の効率性をあげ、安全かつ効率的な動作計画手法を提案する。これによりロボットは人共存環境に適した動作を行うことが期待できる。

2章では環境地図の構築手法について述べる。3章ではマルチレゾリューションマップの構築手法について述べる。4章では経路計画手法について述べる。5章では提案手法の有用性を検証するために地図構築及び経路追従実験を行う。6章ではまとめと今後の課題について述べる。

### 2. 人の使用履歴を表現した環境地図

#### 2.1 空間の使用履歴の表現法

グリッドマップは一般的に各セルに障害物の有無や未知領域などといった情報を有している。グリッドマップの解像度は使用するセンサの精度やその用途によって適宜選択している。人の活動を環境地図に表現する手法として本研究では、先行研究<sup>(9)</sup>の人がどのように使用されているかを移動度合として表現した手法を採用する。これは人やモノの移動に着目し、これら可動物体の移動速度及び移動方向に基づきグリッドマップの各セルに重み付けを行う。この重みを移動度合と呼び、表現したものである。この移動度合を空間の使われ方である使用履歴として表現する。

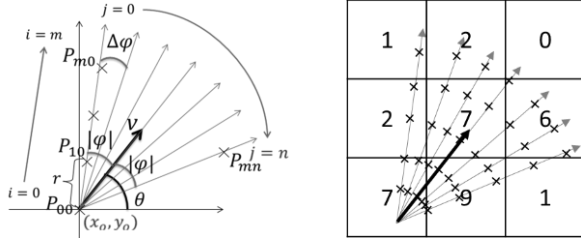
#### 2.2 グリッドマップ構築手法

本節ではグリッドマップの構築について述べる。本研究では環境の計測にレーザ測域センサ(北陽電機製 UTM-30LX)を用いる。これはレーザ光線によりセンサ前方半円状のフィールドをスキャンし、距離データを高速かつ高精度に計測することが可能である。このセンサにより環境を計測し、物体識別するために計測データのクラスタリングを行う。次に、物体識別したそれぞれの物体クラスタについて、観測時間により差分処理を行い静動判別及び動物体位置推定を行う。そして、動物体の位置の時系列データから動物体の移動速度・移動方向を推定する。この推定された動物体の速度・方向に基

づき重み付けの対象点を式(1)のように配置する. この対象点を点数として各セルへ重み付けを行う. その点数を移動度合として定義する. この様子について Fig. 1 に示す.

$$\begin{cases} P_{ijx} = x_0 + i \cdot r \cdot \cos(\theta + \varphi - j \cdot \Delta\varphi) \\ P_{ijy} = y_0 + i \cdot r \cdot \sin(\theta + \varphi - j \cdot \Delta\varphi) \end{cases} \quad (1)$$

ただし,  $\varphi, \Delta\varphi, r$  は設計パラメータである.



(a) Arrangement of points to be weighted (b) Weighted value of each cell to be weighted

Fig. 1 Calculation of the degree of movement

### 3. マルチレゾリューションマップの構築法

#### 3.1 解像度の変更方針

本節では解像度の決定方法について述べる. 構築された環境地図の移動度合は人の活動を示しており, 移動度合の高い領域はよく利用されている空間であり, 移動度合の低い領域はあまり利用されていない空間といえる. 前者は詳細に表現すべき場所であるといえ, 後者は人との遭遇の可能性が低い領域であるため詳細に記述する必要はないといえる. そこで, 移動度合に応じて閾値を設定し段階的に解像度を変更する手法を提案する. 移動度合の高い箇所については高い解像度を保持し, 移動度合の低い箇所については低解像度に変更する. また, 障害物や人の位置などの静止物体は, 環境情報として重要な情報であるため, 一様に最高解像度で表現することとする.

#### 3.2 移動度合の統合

移動度合の重み付けを行ったグリッドマップを最高解像度とする. このときのセルの大きさを 1 として 2, 4, 8, 16, ...,  $2^n$  倍の大きさのセルを持つグリッドマップを構築する. これら大きいセルにて構成したグリッドマップは低解像度となる. セルの大きさ 1 のグリッドマップに対しセルの大きさ二倍の低解像度のグリッドマップを構築するために移動度合の統合をする. セルの大きさ 1 のグリッドマップの近接四セルごとの移動度合を統合し, セルの大きさ二倍のグリッドマップを作成する. この処理を複数回繰り返して, 低解像度化を行った環境地図を構築する. 移動度合の統合を式(2)に示す. また, この統合のプロセスを Fig. 2 に示す.

$$\omega_{(i,j)}^n = \frac{\sum_{k=1}^{k+1} \sum_{l=1}^{l+1} \omega_{(k,l)}^{n-1}}{4} \quad (2)$$

ただし,  $(i,j)$  はセルの位置,  $n$  は解像度 ( $1 \leq n \leq 2^k$ ) ( $k = 0, 1, 2, 4, 8, 16, \dots, m$ ) と定める.

#### 3.3 解像度の決定方法

本節では解像度の決定法について述べる. 自律移動ロボットが経路計画を行うとき障害物の位置は正確に認識する必要があるため一様に最高解像度で表現する. そして, これ以外の領域については次のように決定する.

移動度合が高い領域では人やモノの動きが頻繁に行われている領域であり, ロボットの動作時に人と遭遇する可能性の高い領域といえる. したがって, 高解像度化を行う. 一方, 移動度合が低い領域は変化が少ないと考え低解像度化を行う.

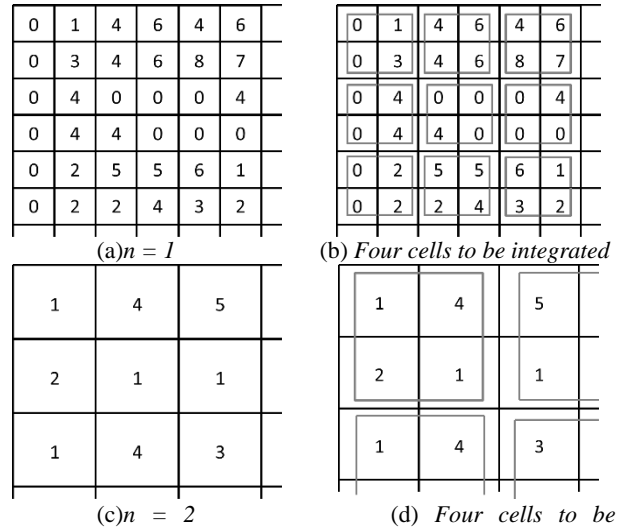


Fig. 2 Process of integration of the degree of movement (the size of cell 1 to 2)

そこで Table 1 に示すアルゴリズムにより段階的に解像度を決定する. これは任意に設定した閾値  $T$  に対して各解像度の移動度合と比較判定し, 解像度を決定する.

Table 1. Algorithm determination of resolution

1:	<b>Algorithm determination of resolution</b>
2:	for $k = 1, 2, 4, 8, 16, \dots, M$ do //Resolutions
3:	for $l = 0$ to $N$ do //Number of cells
4:	if $\omega_l^k < \frac{T}{k}$ then
5:	$\omega_l^k$ : determination
6:	endif
7:	endfor
8:	endfor

この解像度の決定はレーザ測域センサのスキャンごとに行い, セルの分割・統合を行う. マルチレゾリューションマップ構築の解像度の分割・統合のイメージを Fig. 3 に示す. このように静止物体と移動度合に応じて段階的に解像度を決定することにより, 空間の使われ方などの環境情報に応じて解像度を更新していくことができ, 一枚の地図に環境の情報を効率的に表現できる環境地図を記述できる.

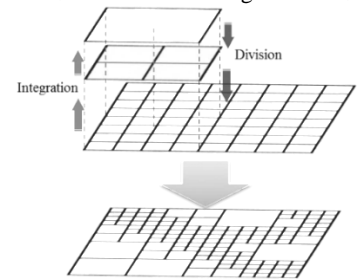


Fig. 3 Process to build a Multi-Resolution Map

### 4. 経路生成手法

#### 4.1 経路計画手法

本節では経路計画手法を述べる. 構築した環境地図に対し各セルの隣接するセルを移動対象とし経路計画を行う. 経路探索手法はグリッドマップを用いたもので広く利用されている A\*アルゴリズムを採用する. A\*アルゴリズムは目的地までのコストが最適解となることが保証されている手法である. 本研究では距離と移動度合をコストとして経路探索を行う. 経路探索のコストの評価式を式(3)示す.

$$f^*(n) = g^*(n) + h^*(n) + \alpha \cdot weight(n) \quad (3)$$

ただし  $n$  はそのときのノード,  $g^*(n)$  はそのノードまでのコスト (経路長),  $h^*(n)$  はそのノードから目的地までの推定コスト (目的地までのユークリッド距離),  $weight(n)$  は移動度合,

$\alpha$ は設計パラメータであり、移動度合の反映率を示す。これらをコストとすることにより、移動度合の高いところである人のよく利用する領域避けた人の活動の妨げにならない動作計画となる。また、A\*アルゴリズムは最良優先の探索である。そのため広域空間などの探索対象が多い場合には探索時間が長くなることが知られている。提案手法は環境情報の表現を効率的に表現したものである。これは必要な場所は高解像度化、不要な場所は低解像度化を行ったもので、環境の表現精度を保ったまま経路探索の対象点となるセル数が減る傾向がある。つまり、マルチレゾリューションマップを利用することにより経路の探索時間が短くなる。

#### 4.2 速度設計

本節では経路追従手法について述べる。生成された経路は、高解像度部では繊細な行動計画、低解像度部では粗い動作計画を行うことができる。そこで、追従する際の動作計画として、解像度の低い領域を走る際は動作する際は何もない空間といえるので速度を上げ、解像度の高い領域では人と遭遇する可能性が高いため安全のために速度を下げる。また、その解像度の有する移動度合により速度の下限を変える。解像度と移動度合と速度の関係を Fig. 4 に示す。以上の手法により、解像度と移動度合による速度設計手法を提案する。これにより、地図を参照することのみにより、障害物付近または人のよく利用する領域では繊細な動作を行い、あまり利用しない領域では大まかな動作が実現可能な速度設計が可能となる。

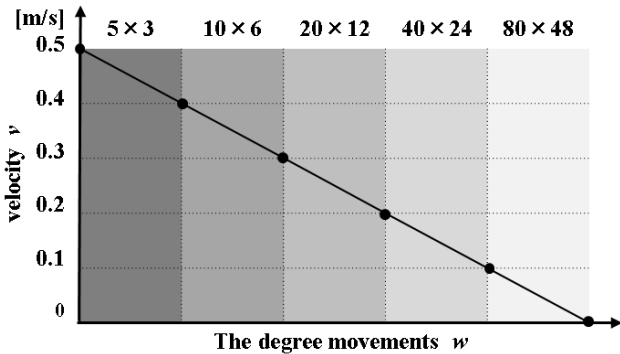


Fig. 4 Setting of the velocity

### 5. 検証実験

#### 5.1 実験目的・方法

提案手法の有用性を検証するために、空間の使用履歴と物体位置より構築した提案手法のマルチレゾリューションマップと均一な解像度で構築したグリッドマップの二種類で環境地図を構築する。そして、構築した環境地図を用いて、経路計画及び経路追従を行い評価する。

本実験では 80×48, 40×24, 20×12, 10×6, 5×3 の五種の解像度で構成されたマルチレゾリューションマップを構築する。最高解像度はセルの大きさは 100mm にて構成する。均一な解像度のグリッドマップは 40×24 の解像度で構成する。セルの大きさは 200mm にて構成する。また、障害物の 200mm は進入禁止領域として設定する。

実験環境を Fig. 5 に示す。図中の歩行経路を二十分間往復する。これにより空間の利用の頻度の差を表現する。そして、経路計画は図中のスタートとゴールにて経路探索をする。

提案手法は経路計画に距離と移動度合をコストとして用いる。移動度合による計画される経路の違いを検証するために考慮する量である設計パラメータを(a) 100%, (b) 50%, (c) 0%の三種で経路計画を行う。すなわち、二種の環境地図にて三つの移動度合の設計パラメータによる計六種の地図構築及び経路計画を行う。

経路追従には MECROBOT (Okateck 製) を使用する。自己位置の計測に超音波式三次位置計測装置 (古河産業製) よ

り計測する。計画された経路と追従時の軌跡を計測する。

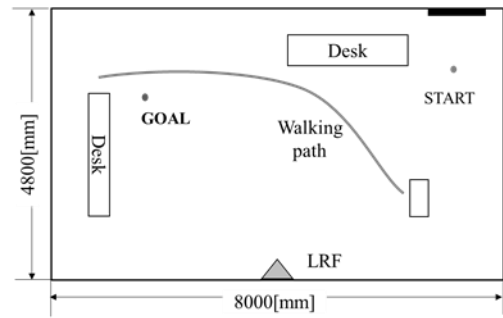


Fig. 5 Experimental setting

#### 5.2 実験結果・考察

提案手法の環境地図の解像度ごとの面積の構成を Fig. 6 に示す。そして、提案手法と均一なグリッドマップにより構築した環境地図及び生成された経路と追従軌跡を Fig. 7 と Fig. 8 に示す。追従軌跡は地図中にプロットし、走行速度をその色の濃淡で表し、色の濃い点が高い速度として示す。

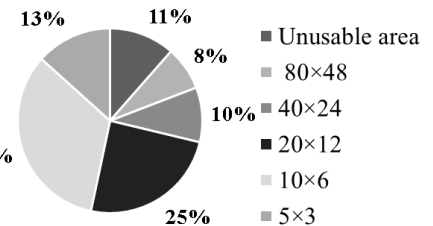


Fig. 6 Structure of resolution

はじめに、構築した環境地図の形状について考察する。提案手法は障害物とその周辺が高解像度で表現されていることがわかる。また、歩行経路部分は移動度合の量により解像度が高く表現されているがわかる。そして解像度ごとの面積の構成から解像度の低い部分が大部分を占めている。これは情報が必要な領域については精度を保持しつつ、情報が不必要な領域については表現の情報を削減した環境地図といえる。

本実験では 40×24 の一種の解像度のみで検証実験を行った。高解像度な均一なグリッドマップでは表現精度は高いが経路探索の計算コストが高くなる。一方、低解像度で構成した場合表現精度が低く正しく環境を把握できない。提案手法は構成するセルの数が少ないため経路探索の計算コストが低くなる。これは広域空間で経路計画を行う際に有効である。

次に、生成された経路とその追従結果について考察する。経路に関する情報を Table 2, Table 3 に示す。均一なグリッドマップと比較すると提案手法は経路が長くなる傾向がある。これはセルの構成によっては直線的に移動することができなくなり、遠回りする経路となる。しかし、経路追従の際に提案手法は経路の通過するセルが少なく、旋回量の少ない経路となる。これにより目的地への到達時間が提案手法のほうが短くなる。そして、移動度合を 100%考慮する場合と考慮しない場合の到達時間の差は、均一なグリッドマップより提案手法のほうが小さい。これは 100%考慮する場合は低解像度の領域を使用した経路となっているため、走行速度が高い経路追従となったと考えられる。

通過したセルの移動度合の合計は人の利用する領域への侵入した度合いといえる。両手法において 50%考慮した場合は人の活動領域にあまり侵入せずかつ、距離・時間的に効率的な移動が実現可能な経路となっているといえる。また、高解像度領域では走行速度が低いため、移動ロボットは人に脅威を与えにくい速度設計となっていると考えられる。

本検証実験では、経路と速度の設計指針は 4 章にて示した手法にて行った。しかし、人の利用する領域は移動ロボットにとっても走行しやすい領域ともいえる。したがって、移動ロボットが行うタスクに基づき、経路と速度の設計指針を改めて定義することにより、目的に応じて適切な動作計画を実

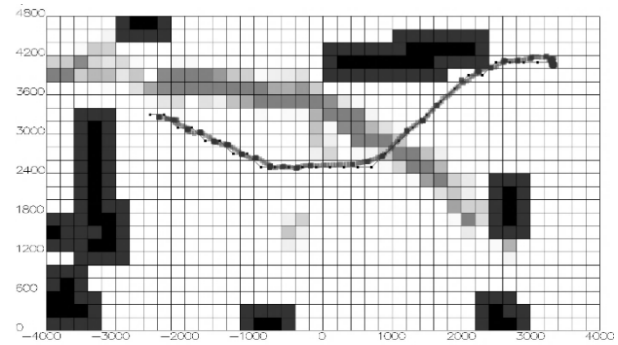
現できる.

Table 2. Result of Multi-Resolution Map

Multi-Resolution Map			
Rate of costs [%]	100	50	0
Path length [mm]	10363.7	6725.68	5922.51
Time[sec]	79	49	64
Sum of the degree movements	3.39062	17	358.625
Num. of passed cells	17	12	24
Turning amount [°]	395.374	183.185	152.434

Table 3. Result of Flat grid map

Flat grid map			
Rate of costs [%]	100	50	0
Path length [mm]	9642.64	6794.11	6331.37
Time [sec]	124	78	64
Sum of the degree movements	0	22	180
Num. of passed cells	43	30	31
Turning amount [°]	1305.04	540.016	360.011



(a) 50 %

Fig. 8 Result of path planning using a flat grid map

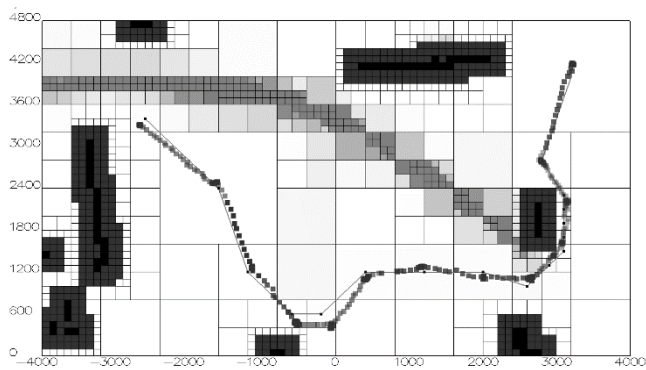
## 6. おわりに

本研究では、人の活動に着目しその空間の使用履歴により部分的に解像度を変更するマルチレゾリューションマップの構築を提案した。そして空間の使用履歴をコストとし経路計画を行い、解像度ごとに速度を変更する。これにより人に危険や脅威を与えず活動の妨げにならず、安全で効率的な動作計画が可能となる。検証実験により、人の活動領域にあまり侵入せずかつ、距離・時間的に効率的な移動が実現可能な経路計画が実現可能であることを示した。

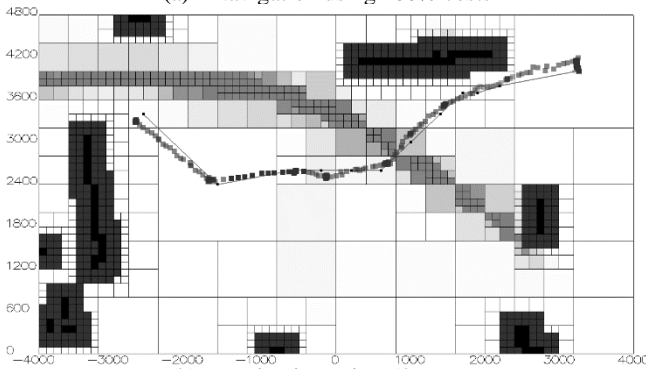
今後の展望として、人が利用する領域、物体位置でのみ行っている。観測の精度や物体の間など走行の際の危険な領域などの環境の情報に基づき解像度を変更することにより、人共存環境に適した効率的な動作が実現可能な環境地図を構築可能であると期待できる。

## 参考文献

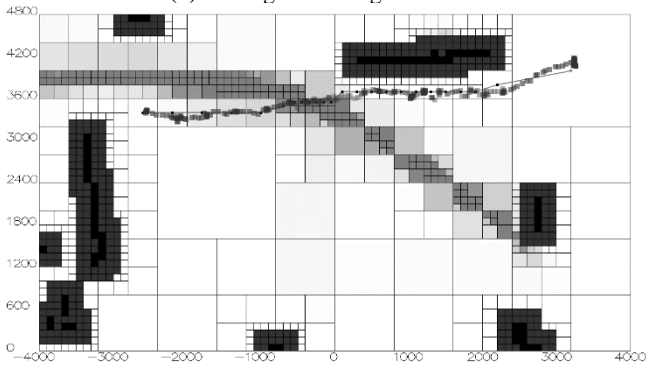
- (1) 伊吹 征太, 木村 憲次, 武田 夏佳, コミュニケーションロボットを用いた高齢者生活支援システム, 日本機械学会誌 108 巻 1038 号, (2005) pp.392-395.
- (2) T. Oyama, E. Yoshida, Y. Kobayashi, Y. Kuno, Tracking visitors with sensor poles for robot's museum guide tour, Human System Interaction (HSI), 2013 The 6th International Conference on, (2013) pp.645 – 650.
- (3) S. Kambhampati, L. S. Davis, Multiresolution Path Planning for Mobile Robots., IEEE Journal of Robotics and Automation, vol.RA-2, no.3, (1986) pp.135-145.
- (4) Kraetzschmar, G.K., Gassull, G.P., Uhl, K, Probabilistic Quadrees for Variable-Resolution Mapping of Large Environments, Proceedings of the 5th IFAC/EURON Symposium on Intelligent Autonomous Vehicles, (2004) pp. 1-6.
- (5) S. Behnke, Local Multiresolution Path Planning., In Proceedings of 7th RoboCup International Symposium, (2003) pp.332-343.
- (6) Y. Toda, N. Kubota, Path Planning using Multi-Resolution Map for a Mobile Robot, Proc. of SICE Annual Conference, (2009) pp.1276-1281.
- (7) T. Sasaki, H. Hashimoto, Human-Observation-Based Extraction of Path Patterns for Mobile Robot Navigation, Industrial Electronics, IEEE Transactions on, Vol.57, (2010) pp. 1401-1410.
- (8) F. Rohrmuller, M. Althoff, D. Wollherr, M. Buss, probabilistic Mapping of Dynamic Obstacles Using Markov Chains for Replanning in Dynamic Environments, IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, IROS2008, (2008) pp 2504 - 2510.
- (9) S. Hiroi, M. Niitsuma, Building a Map including Moving Objects for Mobile Robot Navigation in Living Environments, Proc. of the Ninth International Conference on Networked Sensing Systems, (2012) pp.1-2.



(a) Navigation using 100% costs



(b) Navigation using 50% costs



(c) Navigation using 0% costs

Fig. 7 Result of path planning using a Multi-Resolution Map