

ステレオカメラ搭載二足歩行ロボットの色情情報を用いた障害物回避・経路計画

喜多岡雅明*, 山下淳, 金子透 (静岡大学)

Obstacle Avoidance and Path Planning Using Color Information
for a Biped Robot Equipped with a Stereo Camera System
Masaaki Kitaoka*, Atsushi Yamashita, Toru Kaneko (Shizuoka University)

Abstract

It is necessary to recognize a surrounding environment for a biped robot to move to the destination. This paper presents methods for path planning and obstacle avoidance for the biped robot. In our approach, the robot obtains color information and distance information from images captured by a stereo camera system. Then, the robot generates a 2D grid map that locates flat floor regions, obstacle regions, step regions and unmeasured regions. The robot decides its path by using the 2D grid map. Experimental results show the effectiveness of the proposed method.

キーワード：二足歩行ロボット, ステレオカメラ, 障害物回避, 経路生成, 色情情報
(Biped robot, Stereo camera, Obstacle avoidance, Path planning, Color information)

1. 序 論

現在, 人間が移動しやすいように整備された住居やオフィス内で, 自律して代行作業を行うロボットが期待されている. 例として, 施設内に侵入した不審者を追跡するロボット, 警備を行うロボット, 家庭の中で家事や介護をするロボットなどが挙げられる. このような環境で行動する手段の1つとして, 移動する空間の幅や高さには制約がある場合に, 多数の自由度を利用して行動することができる二足歩行ロボットの研究が盛んに行われている.

ここで, 二足歩行ロボットが自律して行動するには, 周囲環境を認識するための視覚機能が必要である. 梅田ら⁽¹⁾⁽²⁾は, スポット光とカメラを搭載した小型距離画像センサを用いた手法より, 平面領域を検出し, 二足歩行ロボットが歩行中に床面上の障害物を認識して自律的に回避する手法を提案している.

佐部ら⁽³⁾は, ステレオカメラを用いた手法より, 平面領域を検出し, 2次元グリッド地図を生成することで, 障害物を考慮した経路を生成しながら自律的に移動する手法を提案している. また, Gutmannら⁽⁴⁾⁽⁵⁾は, 2.5次元グリッド地図を生成することで, 段差も考慮した経路を生成しながら移動する手法を提案している.

金広ら⁽⁶⁾⁽⁷⁾は, 二足歩行ロボットの動作を生かすために3次元環境を観察して3次元モデルを作り, その結果に応じた移動動作を生成し, 狹隘部の移動する手法を提案している.

以上, 従来研究では, 二足歩行ロボットの視覚機能を利用して, 周囲環境に存在する物体を認識することで地図を生成し, その結果に応じた移動動作を生成している.

これらの研究では, 特定の環境での提案手法であり, 実環境で移動するには, 人間が生活する環境に存在する段差や階段, ドア, 机などのさまざまな障害物を認識し, それに応じた動作を実現する必要がある.

そこで本研究では, 二足歩行ロボットが視覚機能により周囲環境を認識して, その環境に応じた動作を選択し, 目的地までの移動を実現する一連の枠組みを作ることを研究目的とする.

具体的には, 二足歩行ロボットがステレオカメラを利用して環境モデルを生成し, 経路を計画することにより, 目的地までの経路に存在する障害物や段差に対応した二足歩行ロボットの動作選択を行う手法を提案する.

2. 本研究での問題設定

本研究で提案する手法の前提条件は以下の通りである.

- (1) 二足歩行ロボットが移動する環境に存在する物体は, 床面 (二足歩行ロボットが歩行可能な平面), 段差 (二足歩行ロボットが乗り越えられ, 歩行可能な平面で, 床面からの高さ一定), 障害物 (二足歩行ロボットでは乗り越えることができない) の3種類とし, それぞれの物体表面のテクスチャの色は異なっている
- (2) 環境中に位置と大きさが既知の特徴点 (ランドマーク) が存在する

(1) の条件より, 二足歩行ロボットは環境上に存在する物体を色情情報より認識することとする. また, 二足歩行ロボットの移動する環境は3次元環境であるが, 2次元グリッド地図 (2次元空間を等間隔の格子に区切った地図) を用いて周囲環境を表現する. これより, どの位置に床面, 段差, 障害物が存在するのかを区別することで, 周囲環境を表現できる.

(2) の条件より, 二足歩行ロボットは環境中の自分自身の位置, 姿勢を推定することとする.

3. 処理の流れ

本手法の処理の流れを説明する (図1).

まず, 二足歩行ロボットは, 周囲環境をステレオカメラで計測し, 距離情報と色情情報を取得すると同時に, 環境中

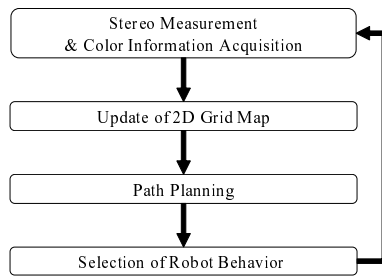


図 1 提案手法

Fig. 1. Proposed method

に設置されたランドマークを用いて自己位置を推定する。

次に、床面、段差、障害物、未計測領域に分けられた 2 次元グリッド地図を構築する。ここでは、計測点の色情報を用いて床面、障害物等を判別することにより、2 次元グリッド地図上の各グリッドが床面、段差、障害物、未計測領域のいずれであるのかを決定する。

さらに、2 次元グリッド地図を用いて、目的地までの経路を生成する。ここでは、二足歩行ロボットと障害物との干渉領域を考慮した 2 次元グリッド地図を生成する。ここで、目的地までの経路生成問題をこの地図の各グリッドをノードとした最短経路探索問題に帰着させる。そして、A*探索による経路探索に用いる⁽⁸⁾ことで、二足歩行ロボットが現在位置から目的地まで効率的に移動できる経路を求める。

最後に、得られた経路に基づいて二足歩行ロボットの動作（前進、右旋回、段差の昇り降りなどの事前に用意された動作）を選択する。

以上の処理の流れを繰り返し、二足歩行ロボットが順次地図の更新、経路計画、移動を行うことで、目的地まで移動する。

4. ステレオカメラによる周囲環境の計測

本研究では、二足歩行ロボットに搭載されたステレオカメラを用いて画像を取得し、周囲環境に存在する物体を計測することにより、距離情報と色情報を取得する。二足歩行ロボットによる周囲環境の計測時の様子を図 2 に示し、そのとき取得した画像の例を図 3 に示す。

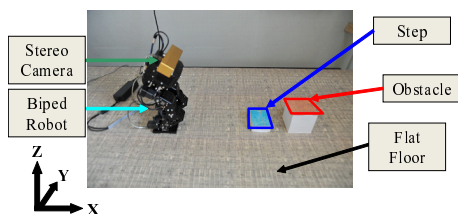


図 2 ステレオカメラ搭載二足歩行ロボット

Fig. 2. Biped Robot Equipped with a Stereo Camera System

本研究では、計測点の色情報を認識することで、その計測点が床面、段差、障害物のいずれであるのかを判別し、距離情報を用いて床面、段差、障害物の位置を判断する。ここで、1 度の計測では、ステレオカメラの視野の範囲やオ

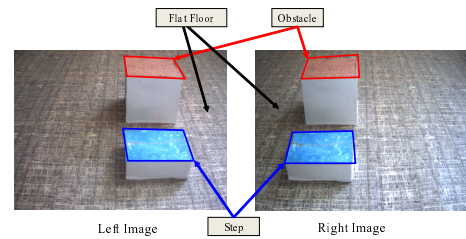


図 3 ステレオカメラより取得した画像

Fig. 3. Stereo Image

クルージョン等の問題より、計測できない領域が存在するため、その領域を未計測領域とする。

また、二足歩行ロボットが現在位置をオドメトリのみで推定すると、環境上での二足歩行ロボットの位置との誤差が生じる。再計測時に得たデータをこれまでに生成した 2 次元グリッド地図に統合することが困難となるため、二足歩行ロボットが地図上のどの位置にいるのを正確に知る必要がある。

そこで、本研究では、山下ら⁽⁹⁾のランドマークによるステレオ観測手法より、自己位置の推定を行う。

5. 距離情報と色情報を用いた地図生成

認識した計測点から距離情報と色情報を用いて、2 次元グリッド地図を生成する方法について説明する。

まず、3 次元空間にステレオカメラより取得した計測点を配置した 3 次元地図を生成する。図 4 は、図 3 の画像を利用して得た 3 次元地図である。

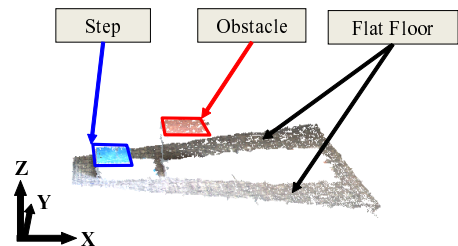


図 4 3 次元地図

Fig. 4. 3D Map

次に、3 次元地図を 2 次元グリッド地図に投影し、各グリッドが床面、段差、障害物、未計測領域のいずれであるのかを判断する。図 5 は、図 4 より生成された 2 次元グリッド地図である。また、各グリッドの色の灰色は床面、青色が段差、赤色は障害物、白色は未計測領域を表している。

このとき、2 次元グリッド地図の各グリッドには、複数の計測点が投影される場合がある。その計測点の色情報が異なる場合、計測点の中で一番多い色のものを選択し、そのグリッドが床面、段差、障害物のいずれであるのかを判別する。グリッドに計測点が投影されなかった場合は、未計測領域であると判断する。

また、本研究では、二足歩行ロボットが提案手法の処理

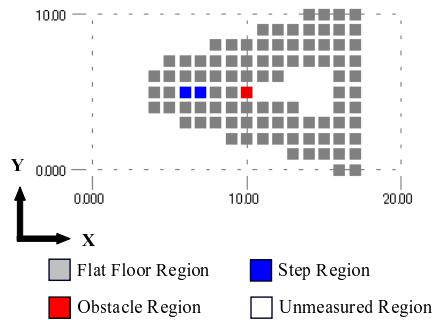


図 5 2次元グリッド地図

Fig. 5. 2D Grid Map

を繰り返す度に再計測を行う。ここで、再計測して取得した計測点を生成した2次元グリッド地図に更新するとき、再計測して得られた床面、段差、障害物のデータをすべて生成した2次元グリッド地図に更新する。この際、これまで計測範囲に含まれなかった領域（未計測領域）が、二足歩行ロボットが移動することで計測可能となること場合がある。この結果を用いて、二足歩行ロボットは目的地までの移動を実現する。

6. 経路計画

二足歩行ロボットが目的地まで安全かつ効率的に移動するため、本研究では2次元グリッド地図を用いて経路計画を行う。

〈6・1〉 コンフィグレーション空間 コンフィグレーション空間とは、二足歩行ロボットを大きさのない点として表現する空間のことである⁽¹⁰⁾。

本研究では、二足歩行ロボットと障害物が接触・衝突する領域を想定し、図6のように、二足歩行ロボットの旋回中心を円の中心とした円に近似する。これより、二足歩行ロボットが、自分自身の大きさを円筒の大きさを有するとみなすことで、姿勢を持たない2次元のコンフィグレーションとして考える。

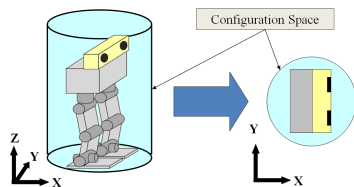


図 6 コンフィグレーション空間

Fig. 6. Configuration Space

〈6・2〉 A*探索による経路計画 二足歩行ロボットの周囲環境を反映した2次元グリッド地図には、各グリッド（床面、段差、障害物、未計測領域など）同士の関係に応じたコストを与える。

そして、この地図の各グリッドをノードとして探索問題

に帰着し、安全かつ効率的に移動する経路を求めるためにA*探索を行う⁽¹¹⁾。

そこで、本研究での各グリッド間のコストの与え方について説明する（図7）。床面から床面または段差から段差（本研究では、段差を床面から一定の高さにある平面と設定している）は、容易に二足歩行ロボットが移動することができる。そこで、このグリッド間を基準としてコストを C_1 とする。

床面から段差または段差から床面の間は移動可能な領域ではあるが、床面に比べ移動する時間が多くなる。そこで、この間のコストは、 C_1 よりも大きいコスト C_2 とする。

床面・段差・未計測領域から未計測領域との間は、その間の領域に何が存在するのかわからないため、再計測が必要である。そこで、この間のコストは、移動する時間に合わせて計測する時間にかかるため、 C_2 よりも大きいコスト C_3 とする。

障害物との間は、二足歩行ロボットで移動することが不可能な領域のため、移動経路として避ける。

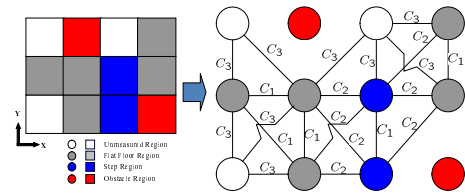


図 7 グラフ探索

Fig. 7. Graph Search

A*探索における評価関数として次式を用いることで、二足歩行ロボットのスタート地点から目的地までの最短経路を求める。

$$f^*(n) = g(n) + h^*(n) \quad (1)$$

ここで、 $f^*(n)$ はノード n を通して目的地まで移動する際の最小見積もりコストである。 $g(n)$ はスタートノードからノード n までのコストである。 $h^*(n)$ は現在の二足歩行ロボットが位置しているノード n からゴールノードまでの見積もりコストである。

7. 二足歩行ロボットの動作選択

本研究では、2次元グリッド地図を用いて生成された経路計画より、二足歩行ロボットの動作選択を行う。

〈7・1〉 床面・段差の上を移動する場合 生成された経路が床面・段差の上を移動する場合、二足歩行ロボットが現在位置のグリッドから次のグリッドに移動するとき、図8(a)のように赤い矢印8方向に移動することができる。

このとき、二足歩行ロボットが前を向いている方向（図8(b)の二足歩行ロボットのローカル座標系の X_r 座標方向）を移動するグリッドの方向に向ける動作を選択する。その後、前進をする動作を選択することで、二足歩行ロボットは次のグリッドに移動する。

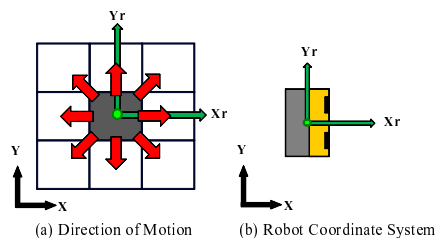


図 8 動作選択

Fig. 8. Selection of Robot Behavior

〈7・2〉 段差を昇り降りする場合 二足歩行ロボットの現在位置のグリッドが床面で、移動予定の次のグリッドが段差の場合、段差を昇る動作を選択することで、図 9 のように段差を昇る。

同様に、二足歩行ロボットの現在位置のグリッドが段差で、移動予定の次のグリッドが床面の場合、段差を降りる動作を選択することで、図 10 のように段差を降りる。

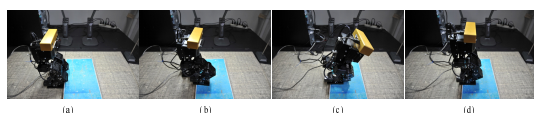


図 9 段差を昇る様子

Fig. 9. Step Up

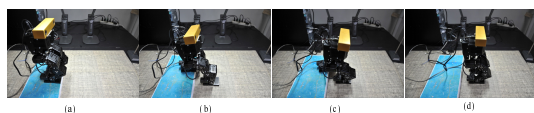


図 10 段差を降りる様子

Fig. 10. Step Down

8. 実 験

〈8・1〉 実験装置 二足歩行ロボットに搭載したステレオカメラは、取得した左右の画像を有線でつながれた計算機に送信する。計算機では、画像処理を行い、経路を生成する。その後、計算機から二足歩行ロボットの動作信号を有線で送信し、二足歩行ロボットが動作する。

ステレオカメラには、ステレオ画像処理に用いる画像サイズが 512×384 pixels, 左右のカメラの基線長が約 12cm の Bumblebee2 を用いた。また、ステレオカメラで 3 次元計測可能な距離は、25cm～300cm と設定した。

計算機には、CPU が Intel Core2 Quad 2.4GHz, メモリが 3GB を用いた。

二足歩行ロボットには、大きさが約 $35\text{cm} \times 16\text{cm} \times 14\text{cm}$ であり、関節自由度が足首 2, 膝 1, 股関節 3, 左右の脚で計 12 関節からなる e-nuvo WALK ver.3 を用いた。

〈8・2〉 実験環境 本手法で用いるステレオ画像処理では、計測する物体にテクスチャが乏しい場合、計測が難しい。そこで実験環境上での床面は図 11 に示すテクスチャ、段差（高さ 3cm）は図 12 に示すテクスチャ、障害物は図

13 に示すテクスチャを有するものを用いた。また、自己位置推定に用いるランドマークは、半径 7.5cm の円を用いた（図 14）。



図 11 床面のテクスチャ

Fig. 11. Texture of Flat Floor



図 12 段差のテクスチャ

Fig. 12. Texture of Step



図 13 障害物のテクスチャ

Fig. 13. Texture of Obstacle



図 14 ランドマーク

Fig. 14. Landmark

実験フィールドは、 $180\text{cm} \times 100\text{cm}$ の大きさで行った（図 15）。実験フィールド上にある黒色の×印で示された場所が、二足歩行ロボットの目的地である。その周囲を囲む黒の目印は、目的地から半径 10cm の位置を表す。

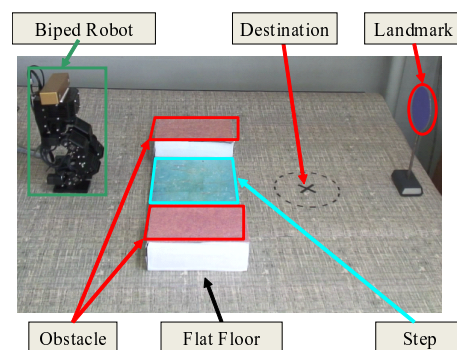


図 15 実験フィールド

Fig. 15. Experimental Environment

本手法で用いる 2 次元グリッド地図は、各グリッドを $5\text{cm} \times 5\text{cm}$ としており、また、A*探索での各グリッド間とのコストについては、床面と床面の間または段差と段差の間のコスト $C_1 = 1$, 床面と段差の間または段差と床面の間のコスト $C_2 = 3$, 床面・段差・未計測領域と未計測領域の間のコスト $C_3 = 20$ と設定した。

〈8・3〉 実験結果 今回の実験では、

- (1) 床面と障害物のみ存在する場合
- (2) 床面と段差のみ存在する場合
- (3) 床面と段差、障害物が存在する場合

において二足歩行ロボットが目的地まで移動する実験を行った。

(1) では、二足歩行ロボットが障害物を回避しながら目的地まで移動可能であることを確認するための実験を行い、(2) では、段差を乗り越えながら目的地まで移動可能であることを確認するための実験を行った。(1)、(2) の実験結果を図 16、図 17 に示す。図 16、図 17 は、2 次元グリッド地図(左図)と二足歩行ロボットが周囲環境を計測した様子(右図)を表している。この 2 次元グリッド地図の各グリッドの色の灰色は床面、青色は段差、赤色は障害物、白色は未計測領域を表し、矢印が二足歩行ロボットが今後目的地まで移動する際に計画した経路を表している。図 16 の (a) は 1 回目、(b) は 3 回目、(c) は 11 回目の計測結果である。1 回目の計測で、二足歩行ロボットは障害物を認識できず、直進して目的地まで移動する経路を計画していたが、3 回目の計測で、二足歩行ロボットは障害物を認識することで、障害物を回避する経路を計画していることがわかる。図 17 の (a) は 1 回目、(b) は 6 回目、(c) は 9 回目の計測結果である。ここでは、二足歩行ロボットは段差の存在を認識することで、回避するよりも段差を乗り越えたほうが速いと判断し、直進しながら目的地にいたる経路を計画していることがわかる。

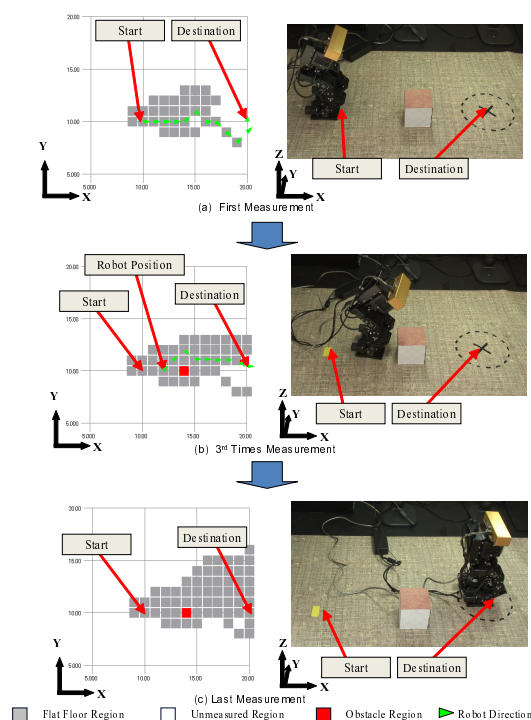


図 16 床面と障害物のみの場合 (1)
Fig. 16. Experimental Result (1)

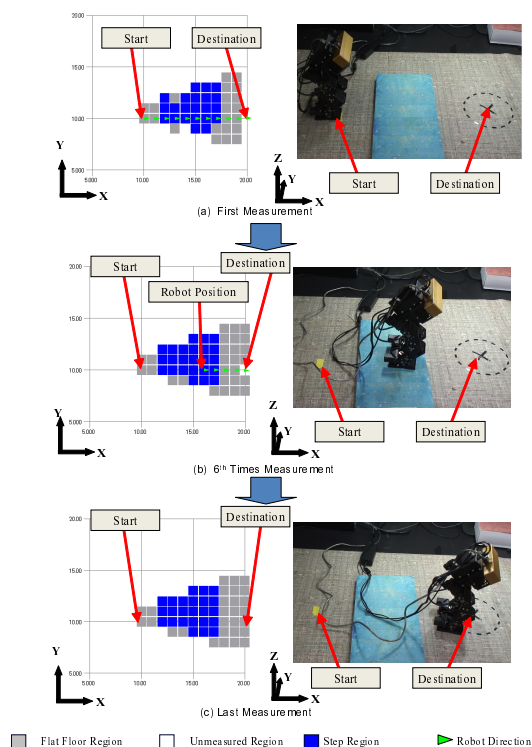


図 17 床面と段差のみの場合 (2)

Fig. 17. Experimental Result (2)

(3) では、床面と段差、障害物が存在する環境で二足歩行ロボットを目的地まで移動を行う実験を行った。ここでは、段差も障害物と判断して乗り越えずに回避しながら移動する方法との比較も行った。(3) の実験結果を図 18、図 19 に示す。図 18 では、床面以外を障害物と判断するため、大回りをして目的地にいたる経路を計画しているのに対し、図 19 では、段差の存在を認識することで目的地にいたる経路を計画していることがわかる。また、2 つの結果を比較すると、移動距離は本手法のほうが、約 100cm 短い距離で目的地まで移動しており、移動時間も、約 5 分早く目的地まで移動していることがわかった。以上より、周囲環境に存在する物体を障害物として回避しながら目的地まで移動するよりも、本手法を用いて周囲環境に存在する物体にあわせた動作をさせることで、目的地まで移動するほうが、移動時間、移動距離に関して優れていることがわかった。

9. 結 論

本研究では、二足歩行ロボットに搭載されたステレオカメラを用いて距離情報と色情報を取得し、二足歩行ロボットが移動する環境に存在する床面や段差などを認識することにより、2 次元グリッド地図を生成した。その後、生成した 2 次元グリッド地図を利用して経路を計画し、二足歩行ロボットが移動経路上で最適な動作を選択することで、目的地まで移動する手法を構築した。実験を用いた実験により、提案手法の有効性を確認した。

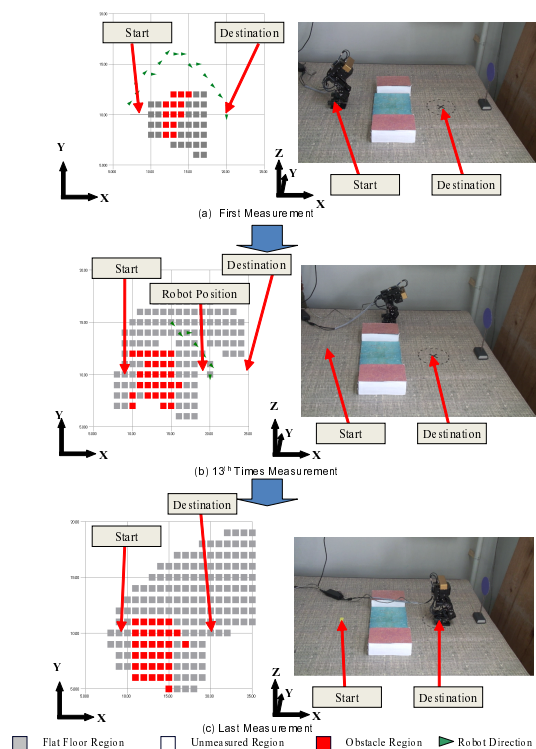


図 18 床面と段差，障害物が存在する場合
(段差も障害物と判断した場合)
Fig.18. Experimental Result (3)

今後の予定として，壁や坂などを認識し，生成する環境モデルを 3 次元にすることで，壁をくぐる動作や坂を上る動作などの実環境に近い環境で行動できるようにすることなどが挙げられる。

参考文献

- (1) Naotaka Hikosaka, Kei Watanabe and Kazunori Umeda: "Obstacle Detection of a Humanoid on a Plane Using a Relative Disparity Map Obtained by a Small Range Image Sensor", *Proceeding of the 2007 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp.3048-3053, (2007).
- (2) 黒木 崇博, 寺林 賢司, 梅田 和昇: "小型距離画像センサにより得られる相対視差画像からの障害物検出の定量的評価", 第 27 回日本ロボット学会学術講演会講演論文集, 3R2-07, pp.1-4, (2009).
- (3) Kohtaro Sabe, Masaki Fukuchi, Jens-Steffen Gutmann, Takeshi Ohashi, Kenta Kawamoto and Takayuki Yoshigahara: "Obstacle Avoidance and Path Planning for Humanoid Robots using Stereo Vision", *Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp.1407-1413, (2004).
- (4) Jens-Steffen Gutmann, Masaki Fukuchi and Masahiro Fujita: "Stair Climbing for Humanoid Robots Using Stereo Vision", *Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*,

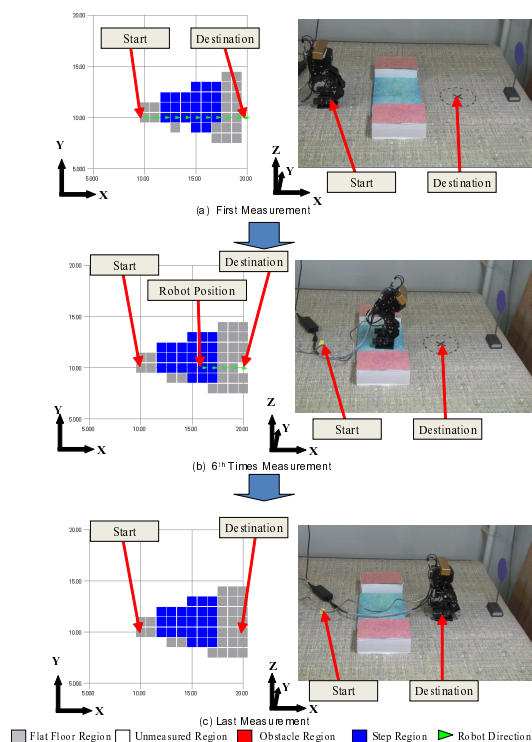


図 19 床面と段差，障害物が存在する場合
Fig.19. Experimental Result (3)

- pp.586-591, (2004).
- (5) Jens-Steffen Gutmann, Masaki Fukuchi and Masahiro Fujita: "A Floor and Obstacle Height Map for 3D Navigation of a Humanoid Robot", *Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp.1066-1071, (2005).
- (6) 金広 文男, 吉見 隆, 尾田 秀司, 森澤 光晴, 金子 健二, 比留川 博久, 富田 文明: "3D グリッドマップを用いたヒューマノイドの狭隘部移動", 日本ロボット学会誌, Vol.25, No.4, pp.589-597, (2007).
- (7) 金広 文男: "ヒューマノイドロボットの環境モデルと歩行計画-3D グリッドマップの利用-", 日本ロボット学会誌, Vol.26, No.4, pp.326-329, (2008).
- (8) Atsushi Yamashita, Tamio Arai, Jun Ota and Hajime Asama: "Motion Planning of Multiple Mobile Robots for Cooperative Manipulation and Transportation", *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol.19, No.2, pp.223-237, (2003).
- (9) Atsushi Yamashita, Kazutoshi Fujita, Toru Kaneko and Hajime Asama: "Path and Viewpoint Planning of Mobile Robots with Multiple Observation Strategies", *Proceedings of the 2004 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp.3195-3200, (2004).
- (10) 太田 順, 倉林 大輔, 新井 民夫: 知能ロボット入門-動作計画問題の解法-, コロナ社, (2001).
- (11) David M.Bourg and Glenn Seemann: ゲーム開発者のための AI 入門, オイラリー・ジャパン社, (2005).