

# ヒューマノイドのオンサイト誘導プランナの実現と行動学習の研究

## Realization of On-site Guidance Planner for Humanoid and Behavioral Learning

小倉 崇 (東京大学)      正 岡田 慧 (東京大学)  
正 稲葉 雅幸 (東京大学)      正 井上 博允 (東京大学)

Takashi OGURA Kei OKADA Masayuki INABA Hirochika INOUE  
Graduate School of Information Science and Technology, University of Tokyo  
#701, Engineering Building No. 8, 7-3-1, Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo, Japan  
ogura@jsk.t.u-tokyo.ac.jp

Although research of human-robot cooperation has been studied, it is common for robots to be mainly passive to operation of human. In order to realize the cooperation work in which robots are active, while robots thinks autonomously, it is desired for men to guide so that the idea changes. This research aims at human-robot collaboration for behavior generation. Therefore, motions are generated by changing a cost coefficient dynamically by human-robot interaction in path planning this time. Our proposed method has two main steps. First one uses new planning scheme that induce planning costs and weights by interaction with men, in order to navigate a robot based on operator's intention. Second one plans footprints along the 3-dimensional path which is generated by the first planner. Finally, experimental results using a real robot is shown. The operator leads a humanoid robot's hands in order to navigate desired plan for avoidance of obstacles.

**Key Word:** path planning, navigation, interaction, humanoid

### 1 はじめに

人間共存型ロボットは、人間との関わり方が重要になってくる。そのため、ロボットの行動中に人間がそれに関与できることが重要である。その場合、ロボットの主体的なロボットの行動を操作するのではなく、図.1のように人間とロボットが思考を共有し、ともに考えることができることが望まれる。本論文では、ロボットの経路計画において、その実行中に人間がその思考に介入でき、行動を誘導できる手法を提案する。

人間とロボットの協調作業としては、単なる教示や対話であったり、ロボットが人間の意図をセンシングするもの [1, 2] であっても、結果として受動的に人間にしたがうものが多い。また経路計画における誘導として、人間が搭乗可能な車輪型ロボットで、ビジョンを人間と共有することによる経路の教示 [3, 4] があるが、それをもとにした自律的な計画は行っていない。二足のヒューマノイドの経路計画においては、センサ情報を利用した経路計画も行われており [5-7]、Chestnuttらは遊脚の着地点の地面の形状、状態に着目し、二足歩行ロボットの足跡の計画を、その地面の状態に依存してコストを決定して、A\*探索を用いて探索することで行っている [8-10]。しかし、人間と共存する可能性のあるヒューマノイドに対して、人間が誘導するという事はこれまでに行われていない。

また、誘導を学習するという事は、ロボットのセンサからの認識能力では獲得不可能な、それが人間の恣意的な意図であれ、仮想的なマップを獲得することに等しい。

本手法は経路探索において、探索コストを、前進、並進、回転で分けて考え、それぞれの重みの違いを利用して、人間に似た、さまざまな振る舞いを発現させる。また、安全性を考慮し、障害物からの距離をコストに加えることで、足跡だけでなく、ロボットの全身の身体性を考慮したプランニングを行う。また、分けたコストに、人間の指示を反映させることで、人間の指示によりロボットの行動を直接指示するのではなく、計画の立て方を誘導する。そして、不確実なマップしかもっていない状態でもローカライゼーションさえ可能であれば、その蓄積によって行動を学習することができる。

本論文はまず、第2章で経路探索問題の定式化を行いヒューマノイド特有の問題を明らかにし、第3章で経路計画をオンサイトで誘導する手法を示す。第4章で等身大ヒューマノイドである HRP2 を用いた実験をすることで、提案する手法を実証し、第5章で結論を述べる。

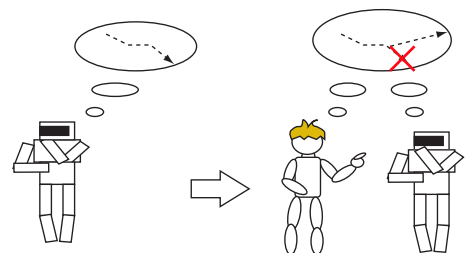


図 1: Concept of Collaborative Navigation Planning

## 2 オンサイト誘導プランナ

本手法はロボットの体幹の経路，足跡位置，全身動作という3段階に切り分けたプランニングを行う．ここではロボットの体幹の経路を決定する，Body Path Plannerについて説明する．このプランナはコストの誘導により，計画を変化させるために最も重要である．このプランナでは  $f(n)$  をヒューリスティック， $g(n)$  を探索コストとし，A\*探索を行う．A\*は  $f(n) = h(n) + g(n)$  が最小であるノードを展開する最適かつ完全な探索である．

また，前提として環境の幾何マップが必要である．Visionを用いたマップの獲得はすでに述べたように行われており，それは可能である．幾何マップには通行できないことがあらかじめ明かである部位（障害物）と，通行できる可能性がある部位がある．また，ロボット自身の幾何モデルも既知とする．

### 2.1 探索コストの設定

探索ノード  $n$  における状態を  $x(n) = (x(n), y(n), \theta(n))$  で表すとき，ノード  $n$  であるアクション  $a$  を実行するときの状態変化は  $\Delta x = (\Delta x, \Delta y, \Delta \theta)$  と表すことができる．ここで  $x(n), y(n)$  はノード  $n$  における，水平面内の座標， $\theta(n)$  は鉛直方向回りの回転角度である．また， $\Delta$  は状態変化の前後の差分である．これを式.1のようにロボットの前進，並進，旋回の変位を表すように変換する．すると状態変化は  $\Delta x' = (\Delta x_s, \Delta x_p, \Delta x_r)$  のように書けるが，これをさらに  $\Delta x = (\Delta x_f, \Delta x_b, \Delta x_{p_r}, \Delta x_{p_l}, \Delta x_{r_r}, \Delta x_{r_l})$  のように6つに分ける．これらはそれぞれ，前進，後退，右並進，左並進，右旋回，左旋回の状態変化であり，それぞれ二つのペアのうち片方は必ず0になる．

$$\begin{aligned} \Delta x_s &= d(n) \cdot r(\theta) \\ \Delta x_p &= d(n) \cdot r(\theta + \pi/2) \\ \Delta x_r &= \Delta \theta = \theta(n+1) - \theta(n) \\ \text{if } \Delta x_s > 0 \quad \Delta x_f &= \Delta x_s, \Delta x_b = 0 \\ \text{else } \Delta x_f &= 0, \Delta x_b = -\Delta x_s \\ \dots & \\ \text{ただし} & \\ d(n) &= (\Delta x, \Delta y) = (x(n+1) - x(n), y(n+1) - y(n)) \\ r(\theta) &= (\cos \theta, \sin \theta) \end{aligned} \quad (1)$$

また， $k(n, a)$  をノード  $n$  においてアクション  $a$  を実行するときのコストとすると， $g(n)$  はその経路における和で表される．ここでロボットの前進，後退，右並進，左並進，右旋回，左旋回移動するときの単位距離あたりのコストをそれぞれ  $K_f, K_b, K_{p_r}, K_{p_l}, K_{r_r}, K_{r_l}$  とすると，単位コストベクトル  $K$  を式.2のように定義する．

$$K = (K_f, K_b, K_{p_r}, K_{p_l}, K_{r_r}, K_{r_l}) \quad (2)$$

通常  $K_f > K_b, K_{p_r} = K_{p_l} (= K_p), K_{r_r} = K_{r_l} (= K_r)$  である． $K$  を用いると  $k(n, a)$  は式.3で求めることができる．

$$k(n, a) = K \cdot \Delta x \quad (3)$$

ここで障害物からの距離を嫌うコストを導入する．そこで，単位移動距離あたりの各コストを  $K_o$  だけ増やすこと

にする． $K_o$  は障害物からの距離の関数である．すると障害物からの距離を嫌うコストを導入した  $K'$  は  $K + K_o(x)1$  と表現される．1はすべての要素が1である6次元ベクトルである．以降はこの  $K'$  を  $K$  として表現する．

### 2.2 ヒューリスティックの設定

$$h(n) = K_f \text{dist}(x_n, x_{goal}) + K_{r_r} |\theta_n - \theta_{goal}| \quad (4)$$

$\text{dist}(x_n, x_{goal})$  はノード  $n$  からゴールまでの水平面におけるユークリッド距離であり， $|\theta_n - \theta_{goal}|$  は姿勢  $\theta$  の差である．係数  $K_f, K_r$  は探索コストで用いた値である．

## 3 プランニングにおけるオンサイト誘導

このような条件のもと，ロボットをプランニングにおいて誘導するために， $g(n)$  コストを利用する． $g(n)$  は  $k(n, a)$  で決定されるため，任意の状態における  $k(n, a)$  を外界からの誘導によって変化させればこれが実現されることが予想されるが， $k(n, a)$  はノード  $n$  の状態  $x$  だけでなく，そこでアクション  $a$  に依存している．一方で誘導はアクションに依存せず，状態だけに依存する．そこで状況だけに依存するパラメータを変化させる必要がある．

そこで単位距離あたりのコスト  $K$  を状態  $x$  に依存する  $K(x)$  に拡張する．すると  $g(n)$  は式.5のようになる． $C$  はそれまでに通過してきたルートである．

$$g(n) = \sum_C K(x) \Delta x \quad (5)$$

また， $K(x)$  は状態だけに依存し，それぞれの値が，前進，後退，右並進，左並進，右旋回，左旋回という状態  $x$  における行動の選考を示すことになる．この蓄積された値を用いることで，以前に経験した誘導が発現させることが可能になる．

ただし，一つの状況だけに誘導が影響させるのではなく，その周りのノードにも影響を及ぼすように式.6のように更新する．

$$K_{new}(x) = \exp \frac{-\|x - x_{navi}\|^2}{2\sigma^2} K_{act}^{navi} \quad (6)$$

経路計画においては，直接ロボットの動作をコントロールするのではなく，ロボットの現在地に対応する C-Space の cell におけるコスト係数  $K(x)$  を更新する． $K_{act}^{navi}$  は  $K_{act}$  より小さく，その値は誘導の強度に依存する．

## 4 実験による検証

### 4.1 システム構成

作成したシステムを図.2に示す．環境の3次元幾何モデルマップ，ロボットの3次元モデル，ロボットの現在位置，ゴールをロボットに与えた．幾何マップからグリッドに切り分け，3次元  $((x, y, \theta))$  の Configuration Space ( $C$ ) を作成し，点ロボットとしてこの空間内を探索する [11] が，用いた3次元幾何モデルマップ (1フロア 約  $500m^2$ ) が巨大であるため，幾何モデル上のロボットの現在位置とゴール

を含むサブ空間のみ探索範囲とすることで、探索を高速化し、オンサイトでの探索を可能にした。C をこれまでに述べた手法によって探索を行い、 $(x, y, \theta)$  のシーケンスを得る。次に Footprint Planner について説明する。これは3次元の経路に沿って足跡位置を決定する手法を考案し、足跡位置を決定してゆく。概要を図.3 に示す。得られたパスを支持足方向から90度誘脚側の方向にオフセットし、そのパスと誘脚の着地可能領域との境界を次の足跡とする。そして、その結果を Footstep Planner に渡し、足跡から全身の歩容計画を行い、歩行による移動が実現する。また、センサ入力から現在位置のコスト係数を C の現在のノードにおけるコスト係数に反映させる。Localizer はランドマークからロボットの位置を修正する。また、実際には作成しなかったが、幾何マップを視覚情報を用いて更新する仕組みがあることが望ましい。

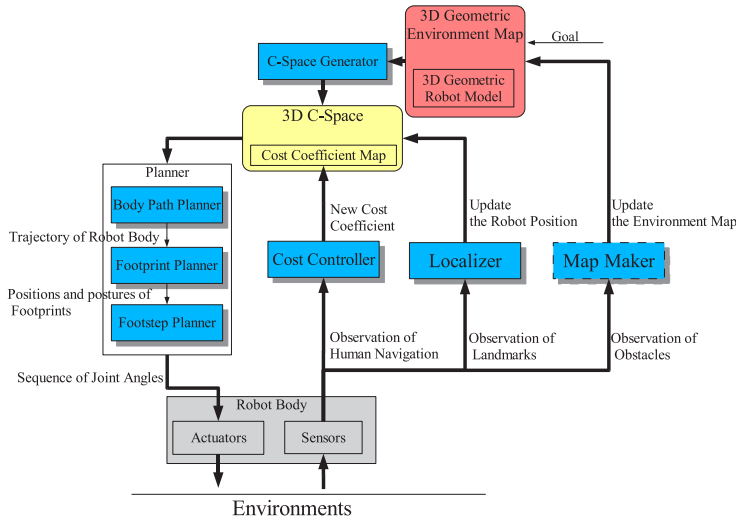


図 2: Experimental system

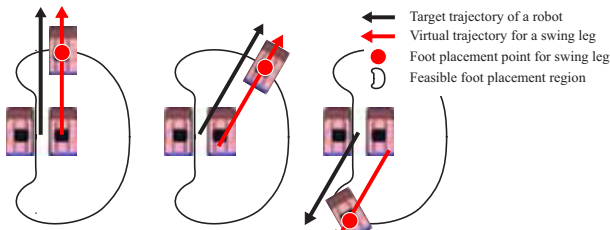


図 3: Footprint planning. Put a footprint along an offset trajectory of a robot as long as inside feasible foot placement region.

## 4.2 結果

最初に図.5 上のような計画を行ったが、歩行開始後、人間がその先にある障害物に気が付き、図.6 (2) に示すように、向かって左方向へ誘導を一度行った。その結果図.5 上のような計画が行われ、結果として図.6 (3)-(6) に示すように、新しい計画に従い、横歩きを交えつつ目標地点まで到達した。コストの変化の様子を図.4 に示す。中列がはじめの計画時のコストであり、右列が誘導後のコストである。色の薄い部分が障害物もしくは未探索部分である。左列がヒューリスティックである。

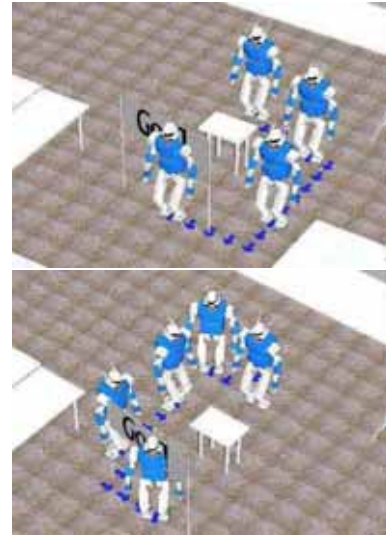


図 5: Change of path plan by on-site navigation. The left picture is the initial plan. The right is the plan that is induced by human navigation.

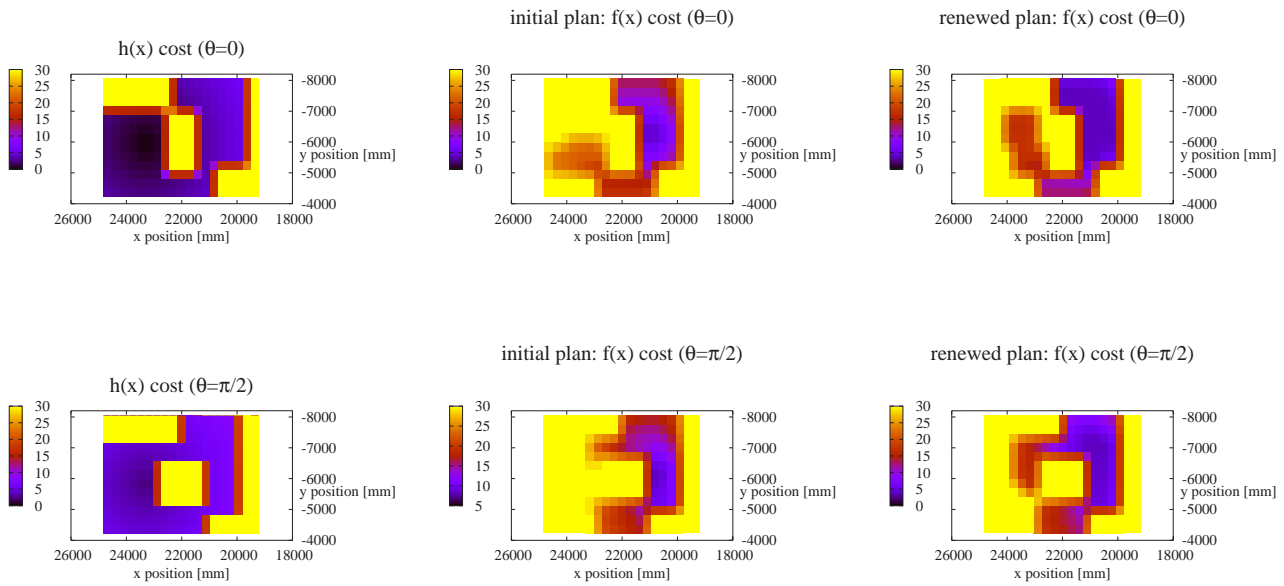
## 5 おわりに

本論文では、人間がオンサイトにロボットの計画に介入することを可能にするために、探索におけるコストを前進、並進、旋回で分けて最適探索を行うことで、ヒューマノイドに適した経路探索を実現し、その各コスト係数を変化させることで、経路計画をオンサイトで誘導可能にする手法を示した。また、その蓄積により行動を学習させることができることを示した。そして実際にロボットに本手法を実装し、実世界での経路計画を動的に誘導可能であることを示し、有効性を確認することができた。

今後の課題としては、視覚に基づくマップを利用した行動をすることが、未知の空間での動作を可能にする上で非常に重要であり、また、マップの更新、ローカライゼーション、誘導、再計画の流れをいかなるタイミングで行うかも重要な課題である。また、コストの学習において、この手法では過学習がおきてしまう。時間の経過につれ学習結果を忘れるような効果が必要である。

## 参考文献

- [1] H. Kimura and T. Horiuchi and K. Ikeuchi. Task-Model Based Human Robot Cooperation Using Vision. In *Proceedings of the 1999 IEEE/RSJ Intl. Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS'99)*, Vol. 2, pp. 701-706, 1999.
- [2] T. Takubo and H. Arai and K. Tanie. Virtual Non-holonomic Constraint for Human-Robot Cooperation in 3-D Space. In *Proceedings of the 2000 IEEE/RSJ Intl. Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS'00)*, Vol. 2, pp. 300-305, 2000.
- [3] T. Shibata, Y. Matsumoto, T. Kuwahara, M. Inaba, and H. Inoue. Hyper scooter: a mobile robot sharing visual information with a human. In *Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 1074-1079, 1995.



⊠ 4: Change of G cost by on-site navigation. Left 2 figures are heuristics maps. The areas covered with obstacles are yellow. Middle 2 figures are  $f(n)$  cost maps used by initial plan. This shows that clockwise path is generated. Counter clockwise path is created because that 2 maps are renewed by human navigation (right).



⊠ 6: The scene of a real world navigation. The first plan is changed and the humanoid is navigated as the human intened.

- [4] Yoshio Matsutmoto, Masayuki Inaba, and Hirochika Inoue. Visual navigation using view-sequenced route representation. In *In Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 83–88, 1996.
- [5] Javier F. Seara, Klaus H. Strobl, and Gunther Schmidt. Path-dependent gaze control for obstacle avoidance in vision guided humanoid walking. *Proceedings of the 2003 IEEE/RSJ International Conference on Robotics & Automation*, pp. 887–892,

2003.

- [6] M. Yagi and V. Lumelsky. Biped robot locomotion in scenes with unknown obstacles. In *Proceedings of the 1999 IEEE Intl. Conference on Robotics and Automation (ICRA '99)*, pp. 375–380, 1999.
- [7] Kei Okada, Masayuki Inaba, and Hirochika Inoue. Walking Navigation System of Humanoid Robot using Stereo Vision based Floor Recognition and Path Planning with Multi-Layered Body Image. In *Proceedings of the 2003 IEEE/RSJ Intl. Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS'03)*, pp. 2155–2160, 2003.
- [8] Joel Chestnutt, J.J. Kuffner, K. Nishiwaki, and S. Kagami. Planning biped navigation strategies in complex environments. In *In Proc. 2003 IEEE Int'l Conf. on Humanoid Robotics*, 2003.
- [9] J.J. Kuffner, K. Nishiwaki, S. Kagami, M. Inaba, and H. Inoue. Footstep planning among obstacles for biped robots. In *In Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, pp. 500–505, 2001.
- [10] J.J. Kuffner, K. Nishiwaki, S. Kagami, M. Inaba, and H. Inoue. Online footstep planning for humanoid robots. In *In Proc. IEEE Int'l Conf. on Robotics and Automation*, pp. 932–937, 2003.
- [11] T. Lozano-Prez and M. Wesley. An algorithm for planning collision-free paths among polyhedral obstacles. In *Comm. ACM*, Vol. 22, pp. 560–570, 1979.