

# 複雑度適合法による人型ロボットの大規模環境内長距離経路計画

清水康志 (日産自動車)<sup>†</sup>

○杉原知道 (大阪大学)

## 1. はじめに

大規模な自然災害や人災の直後には、人の高度な知識や技術が必要とされ、しかも人が容易に現場に赴けない状況が生じることを、我々は大き過ぎる代償を払って学んだ。そのような状況で、即座に人を代替できるロボットが切望されている。人型ロボットはその有力な候補である。遠隔操縦によって人の状況理解・判断能力を用いることができるとしても、必ずしも良好でない通信条件下で、限られた情報を頼りに現場の状況を把握するのはほぼ不可能である。また、大自由度な人型ロボットを操縦することは、それだけで極めて難易度が高い。したがって人型ロボットの自律性向上、なにかんづく経路計画は重要課題である。

人型ロボットの経路計画は、大次元空間において複雑な幾何学的拘束条件の下に座標列を求める、数学的に困難な問題である。探索空間を低次元化することで問題を簡単化する方法 [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8] が多く提案されている。これらは、比較的疎な環境ではうまく機能するが、姿勢変形による多彩な動作表現を諦めるため、障害物を跨いだりくぐり抜けたりして移動できる可能性を見逃してしまう。全身大自由度を活用する複雑環境内経路計画法 [9, 10, 11, 12, 13, 14] も多く提案されているが、前者に対し計算コストが大幅に増える。状況に応じて、前者と後者をどのように使い分ければ良いのか、すなわち身体表現の複雑さをどのように適合させるかは、自明でない。

筆者ら [15] は、まず体積可変な単純形状を用いて概経路を発見し、それを形状の体積に基づいて、ロボットを包含する区間と、動作によっては踏破できる可能性のある区間に分け、それぞれで効率的な全身経路探索法を選択する複雑度適合法を提案した。これまでに、一般的な生活空間を模した環境モデルで有効性を認めている。本稿ではさらにその後実施した、大規模プラントを模した人工的環境モデルにおける経路計画について報告する。人型ロボット経路計画の想定環境としては複雑な部類に入り、従来方法のほとんどがそのままでは適用すらできない例題であるが、提案方法は10回の試行のうち100%の成功率を示した。

## 2. 複雑度適合法による経路計画 [15]

ロボットの全身姿勢を、体幹位置・姿勢を表す6変数と全関節変位によって表現する。環境情報は、変形しない多数のポリゴン群として与えられているものとする。経路計画の目的は、両足以外の身体が環境に侵入・接触せず、また身体部位同士の干渉（自己干渉）も生じていない、初期姿勢と目標到達姿勢を結ぶ姿勢遷移列を求めることである。これを補間し連続な運動軌道とする問題は、本稿では扱わない。

<sup>†</sup>本研究は、第一著者が大阪大学において修士研究として行った。

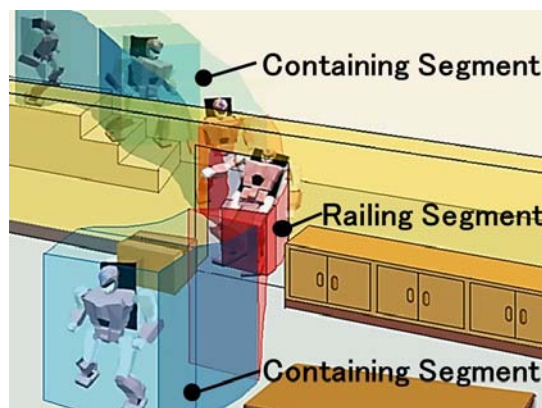


図1 体積可変な直方体に基づく概経路

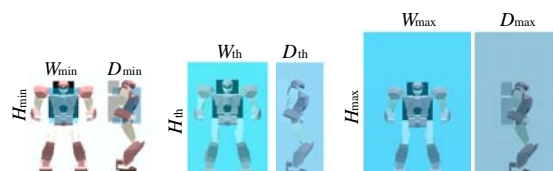
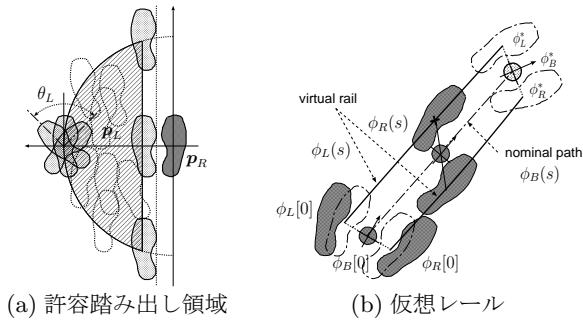


図2 直方体の体積可変範囲

前章にて指摘した通り、計算コストの低い低次元空間での経路探索と、多彩な動作表現が可能な大次元空間での経路探索を状況に応じてどのように使い分けられるかが大きな問題である。複雑度適合法ではこれを解決するために、まず単純な形状を用いて概経路の探索と環境の疎密の評価を行い、疎な区間では比較的単純な身体表現、密な区間では全身自由度を考慮した身体表現を使い分けて全身経路を計画する。図1はそのアイデアを示したものである。

前段の概経路探索では、体積可変な直方体でロボット身体を近似する。図2に示すように、直方体は実際のロボットよりもある程度小さい体積から大きく包含する体積まで変化する。経路探索にはRRT-connect[16]を用いる。閾値よりも大きな直方体から成る区間はロボットが環境と干渉せずに存在できる空間を表し、小さな直方体から成る区間は、干渉しないことが保証しないがロボットの大きさに近い空間があり、全身をうまく変形すれば通過できる可能性があることを示唆する。この意味で、直方体体積は環境の疎密を評価していると言える。全体概経路のうち前者を**包含区間**、後者を**糸口区間**と呼ぶことにする。後段では、それぞれの区間で適切な方法を選択し、全身経路探索を行う。

包含区間では、環境との干渉が起らないことが保証されている。そこでKobayashiら[17]の方法を用い、自己干渉を中心に扱う。これは、区間初期姿勢での体幹位置と区間終端姿勢での体幹位置を滑らかに接続するノミナル体幹経路を求め、それに沿って敷かれる仮想レールと呼ばれる両足の経路と支持足に対する許容踏み出し領域との交点のうち、一步の移動距離を最も大きくできるものを次の支持足の位置として選ぶもの



(a) 許容踏み出し領域 (b) 仮想レール  
図3 小林ら [17] の体幹・両足誘導法

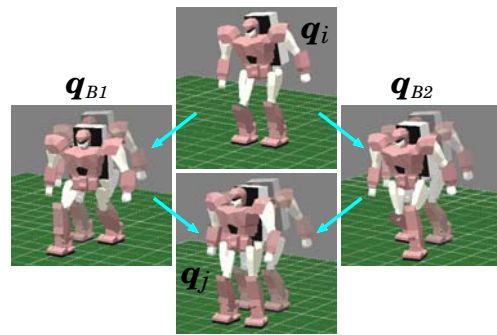


図6 バイパス姿勢の挿入

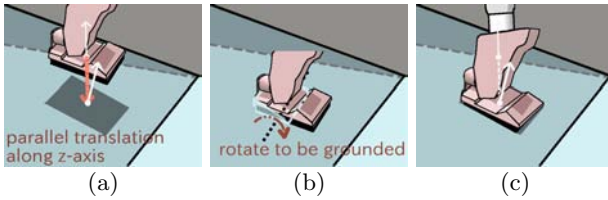


図4 実際の地形に合わせた接地操作

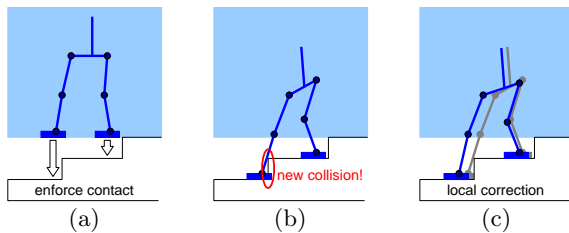


図5 (b) 接地操作によって起こる新たな干渉を, (c) 元の足位置近傍で解消する配置を探索する

である。許容踏み出し領域を設けることによって、両足の過度の開きや交差を起こさず区間終端姿勢まで到達する姿勢遷移列を得る。図3にこの考え方を図示する。

上記の方法は水平面を仮定するので、実際の地形に合わせて接地操作をしなければいけない。その際に図5(b)に示すように、考慮していなかった新たな干渉が起こる可能性がある。そこで、図5(c)のように元の足位置近傍で干渉しない新たな足の配置を探索する。これにはRRT-escapement[18]を用いる。

一方の糸口区間においては、全身姿勢を表す大次元空間でRRT-connectによって効率的に経路探索し、その後実用的な滑らかな経路に整形するNishiら[14]の方法を用いる。区間の両端点から生じた二つの探索木から、乱数的に生成した姿勢に向かって近づくような姿勢を求め、接地処理を施した後に探索木を伸ばす。二つの探索木が接続されれば経路が求まったと言える。このようにして得た経路は、鋸歯状で回り道しがちである。そこで、経路上で短絡できる二つの姿勢の間に図6のようにバイパス姿勢を挿入し、グラフ探索を用いて無駄な回り道部分を間伐した後、図fig:averagingに示すような中間姿勢への置き換えの繰り返しによって全体の経路形状を平滑化する。

### 3. 大規模プラント内長距離経路計画

提案方法の応用例として、図8に示すような大規模プラントを想定したモデル環境内での経路計画を行った。この環境は、隘路、手摺り、階段、柱、頭上障害物、足元障害物、配管用操作バルブ等を含む。ロボット

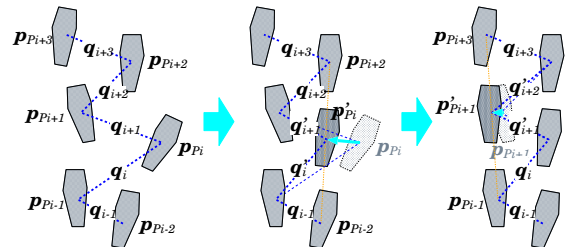


図7 中間姿勢への置き換え繰り返しによる経路平滑化

表1 計算結果 (西らの方法との比較)

方法	計算時間	成功率
西らの方法	$(7.31 \pm 2.55) \times 10^4$ [s]	0/10
提案方法	$(2.57 \pm 2.30) \times 10^3$ [s]	10/10

の初期姿勢は図9(a)のように、階上隘路から出発するものとし、また目標到達姿勢は同図(b)のように、階下のバルブに到達させるよう設定した。人型ロボット経路計画の想定環境としては複雑な部類に入り、全身の姿勢変形を活用した3次元的な移動が要求されるため、従来方法のほとんどがそのままでは適用できない。その中で、Nishiら[14]の方法は想定環境に関する制約が比較的少なく、利用できる可能性がある。そこでこれを比較対象とし、同一条件で経路計画を試みた。

以下の計算は、CPUにIntel Core(TM) i7-2720QM 2.2GHz, RAM 8GBを搭載したPC上にて行った。提案方法と西らの方法それぞれにおいて、10回ずつ計算を行った。表1に結果をまとめる。西らの方法が結局全ての試行において経路探索に失敗したのに対し、提案方法が10回とも成功したことは特筆すべきことである。また、西らの方法は多くの場合20時間経っても計算が終わらなかった(失敗判定できなかった)のに対し、提案方法の平均計算時間は15~30分程度、最悪の場合でも1時間半ほどであった。

計画された経路の例を図10~13に示す。図10は、提案方法の第一段階にて計画された体積可変な直方体の経路であり、図中、青い部分は包含区間、赤い部分は糸口区間である。サンプリングされた直方体の体積を最大化することで、経路の大部分を包含区間と判定できている。このことが、計算成功率と計算時間短縮に大きな効果を及ぼしたと考えられる。糸口区間は、隘路から階段へと折れ曲がる地点、柱、頭上にパイプがあるエリアの近辺に散見される。図11は、間伐・平滑化を施す前後の経路を示したものであり、円形隘路の出口付近、階段の開始・終了地点付近で特にその効果

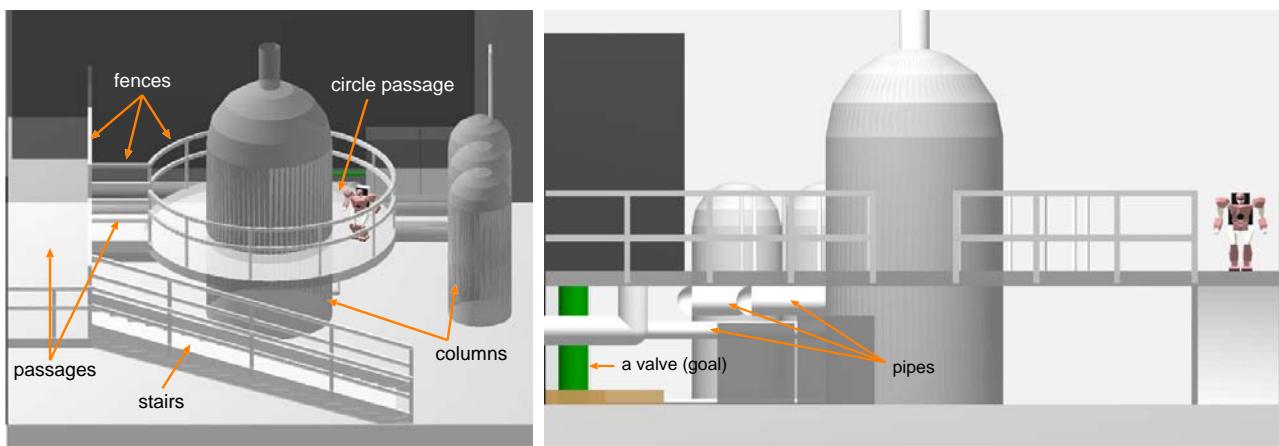
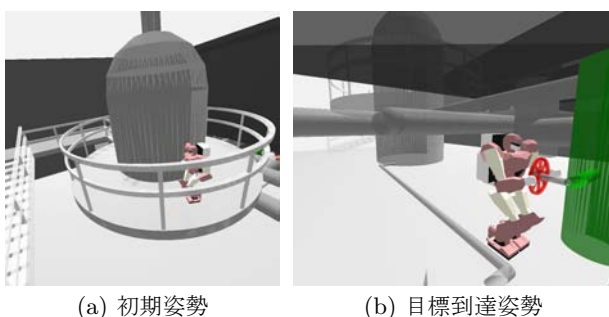


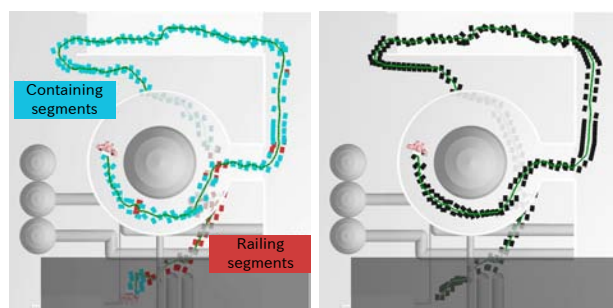
図8 試験に用いた仮想大規模プラントモデル，隘路，手摺り，階段，柱，頭上・足元障害物，操作バルブ等を含む



(a) 初期姿勢

(b) 目標到達姿勢

図9 初期姿勢および目標到達姿勢，階上隘路から出発し，階下のバルブに到達するまでの経路を探索する



(a) 間伐・平滑化前の経路

(b) 間伐・平滑化後の経路

図11 間伐・平滑化実施前後の両足支持遷移列の支障をできるだけ低減する工夫が望まれる。

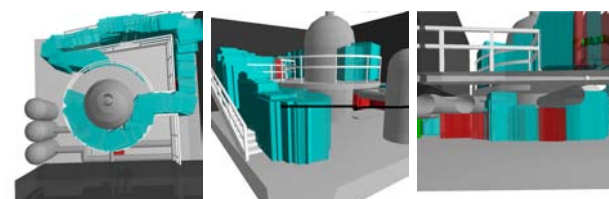


図10 計画された概経路と区間の例

が見られる。図12は，頭上にパイプがあるエリアをロボットが後ろに仰け反る姿勢で通過する部分経路，図13は，ロボットがバルブに到達する近辺での終端経路の様子をそれぞれ示したものである。

提案方法は高い計算成功率を示したものの，幾つか解決すべき問題を残している。第一に，概経路の探索においてロボットの方位は全く考慮されていないので，後ろ向きに歩行する経路が出力される場合が何度かあった。それらは数学的には正しいが，特に実際の場面においてロボットの視覚情報等を作業に用いることを考えると当然好ましくはない。ロボットの視野や指向性の情報を付加することで，結果を改善できると考えている。間伐・平滑化处理も，例えば図12の結果を見ると，問題がないとは言えない。経路は依然として鋸歯様を示し，無駄なステップも削除し切れていない。概経路探索の段階での平滑化の質を，さらに向上すべきであろう。15~30分という計算時間は，従来方法に比べれば現実的な数字であるが，人が自分の経路を見出すのに通常要する時間よりははるかに長い。経路計画と作業実行（移動）を並列して行うなど，オペレーショ

#### 4. 結論

筆者らがこれまで提案してきた複雑度適合法の応用例として，大規模プラントを模した人工的な環境内の長距離移動経路計画を行った。計画の成功率および計算時間で，従来方法より格段に優れた成績を示した。人型ロボットが危険環境等で人の作業を代行し得るまでに進化するための，重要な自律化機能開発の一助になったと考える。言うまでもなく，経路計画以外にも環境認識や地図作成等，様々な重要課題があり，それらを同一のロボットシステムの上に統合するために多角的なアプローチが求められる。

本研究は，科学研究費補助金若手研究(A) 課題番号#22680018(研究代表者:杉原知道)の支援で行われた。

#### 参考文献

- [1] J.J. Kuffner, K. Nishiwaki, S. Kagami, M. Inaba, and H. Inoue. Footstep Planning Among Obstacles for Biped Robots. In *Proc. of the 2001 IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, pp. 500-505, 2001.
- [2] Z. Shiller, K. Yamane, and Y. Nakamura. Planning Motion Patterns of Human Figures Using a Multi-layered Grid and the Dynamics Filter. In *Proc. of the 2001 IEEE Int. Conf. on Robotics & Automation*, pp. 1-8, 2001.
- [3] J. Chestnutt, J.J. Kuffner, K. Nishiwaki, and S. Kagami. Planning Biped Navigation Strategies in Complex Environments. In *Proc. of the 2003 IEEE Int. Conf. on Humanoid Robots*, 2003.

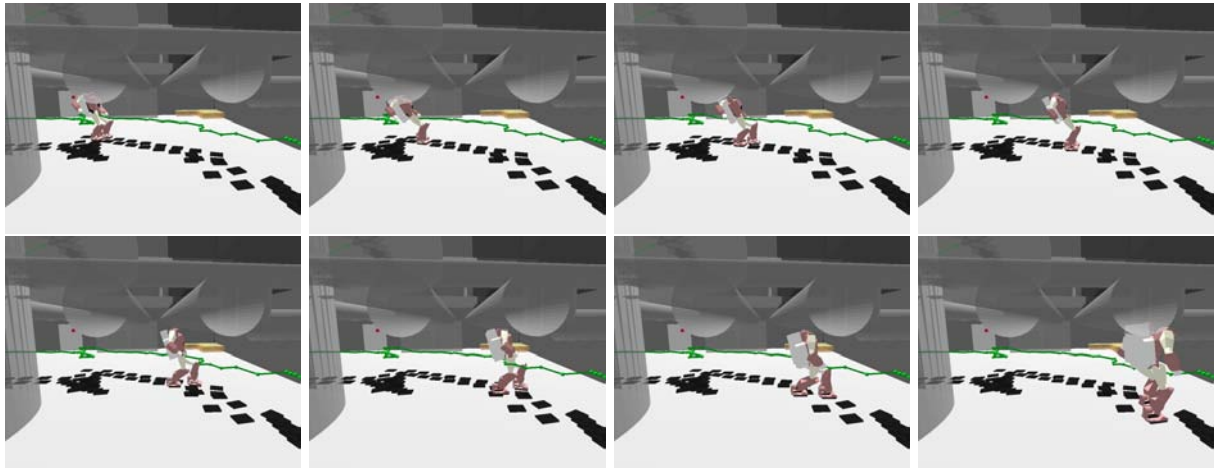


図 12 頭上障害物を回避している部分経路

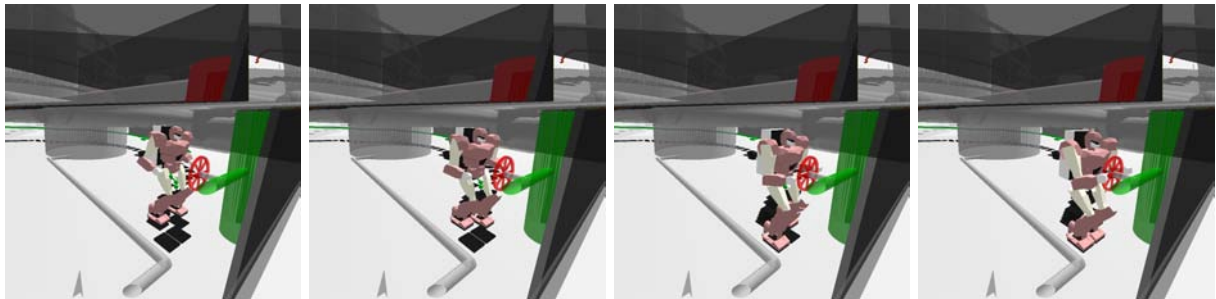


図 13 バルブ到達直前の部分経路

- [4] F. Kanehiro, T. Yoshimi, S. Kajita, M. Morisawa, K. Fujiwara, K. Harada, K. Kaneko, H. Hirukawa, and F. Tomita. Whole Body Locomotion Planning of Humanoid Robots based on a 3D Grid Map. In *Proc. of the 2005 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 1072–1078, 2005.
- [5] J-S. Gutmann and M. Fukuchi and M. Fujita. Real-time path planning for humanoid robot navigation. In *Proc. of the 19th Int. Joint Conf. on Artificial Intelligence*, pp. 1232–1237, 2005.
- [6] E. Yoshida. Humanoid Motion Planning using Multi-Level DOF Exploitation based on Randomized Method. In *Proc. of the 2005 IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, pp. 25–30, 2005.
- [7] E. Yoshida, I. Belousov, C. Esteves, and J-P. Laumond. Humanoid Motion Planning for Dynamic Tasks. In *Proc. of the 2005 IEEE-RAS Int. Conf. on Humanoid Robots*, pp. 1–6, 2005.
- [8] N. Perrin, O. Stasse, F. Lamiroux, Y.J. Kim, and D. Manocha. Real-time footstep planning for humanoid robots among 3D obstacles using a hybrid bounding box. In *Proc. of 2012 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 977–982, 2012.
- [9] K. Hauser, T. Bretl, and J-C. Latombe. Non-gaited Humanoid Locomotion Planning. In *Proc. of the 2005 IEEE-RAS Int. Conf. on Humanoid Robots*, pp. 7–12, 2005.
- [10] K. Hauser, T. Bretl, K. Harada, and J-C. Latombe. Using Motion Primitives in Probabilistic Sample-Based Planning for Humanoid Robots. In *Proc. of the 2006 Workshop on the Algorithmic Foundations of Robotics*, Vol. 47, 2006.
- [11] H. Sanada, E. Yoshida, and K. Yokoi. Passing Under Obstacles with Humanoid Robots. In *Proc. of the 2007 IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, pp. 4028–4034, 2007.
- [12] K. Harada, S. Hattori, H. Hirukawa, M. Morisawa, S. Kajita, and E. Yoshida. Motion Planning for Walking Pattern Generation of Humanoid Robots. In *Proc. of the 2007 IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, pp. 4227–4233, 2007.
- [13] K. Bouyarmane, A. Escande, F. Lamiroux, and A. Kheddar. Potential Field Guide for Humanoid Multicontacts Acyclic Motion Planning. In *Proc. of the 2009 IEEE Int. Conf. on Robotics & Automation*, pp. 1165–1170, 2009.
- [14] T. Nishi and T. Sugihara. Thinning and Smoothing of Randomly-sampled Support Transitions Toward Practical Motion Planning for Humanoid Robots. In *Proc. of the 2010 IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, pp. 1702–1707, 2010.
- [15] Y. Shimizu and T. Sugihara. Efficient Path Planning of Humanoid Robots with Automatic Conformation of Body Representation to the Complexity of Environments. In *Proc. of 2012 IEEE-RAS Int. Conf. on Humanoid Robots*, pp. 755–760, 2012.
- [16] J.J. Kuffner and S. M. LaValle. RRT-Connect: An Efficient Approach to Single-Query Path Planning. In *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 995–1001, 2000.
- [17] H. Kobayashi and T. Sugihara. Self-consistent Automatic Navigation of COM and Feet for Realtime Humanoid Robot Steering. In *Proc. of the 2009 IEEE/RSJ Int. Conf. on Robots and Systems*, pp. 3525–3530, 2009.
- [18] 清水康志, 杉原知道. 人型ロボットの段階的経路計画に伴う小範囲干渉の局所的解消. 日本ロボット学会第30回記念学術講演会予稿集, 4K3-8, 2012.