足にバネを有する2足ロボットの着地制御法と 高さ未知地形での歩行実験*

山田 萌^{*1}, 佐野 滋則^{*2}, 内山 直樹^{*2}

Landing Control for Biped Robot with Spring Embedded Feet and Walking Experiment on Unknown and Uneven Terrain

Moyuru YAMADA^{*1}, Shigenori SANO and Naoki UCHIYAMA

^{*1} Graduate School of Mechanical and Structural System Engineering, Toyohashi University of Technology
1-1, Hibarigaoka, Tenpaku, Toyohashi, Aichi, 441-8580, Japan

This paper deals with landing control to achieve stable biped walking on unknown and uneven terrain, and presents a walking control method that consists of a walking motion generator and landing controller. It is important to suppress an impact force and to place a foot on the actual ground for landing on such terrain. Because the conventional foot generally has a rigid body, it is difficult to suppress the impulsive reaction force. To achieve the above two objectives simultaneously, a landing controller for adjusting a foot position by feeding back the reaction force has been proposed in our previous study. This controller provides the robust stability of control system with respect to terrain variance and exact positioning of the foot to actual ground without exceeding reaction force. In this study, this controller is applied to a simple biped robot that has spring embedded feet. The effectiveness of the proposed walking control method on unknown and uneven terrain is demonstrated experimentally.

Key Words : Biped Walking on Unknown Terrain, Landing Control, Spring Embedded Foot

1. 緒 言

2足歩行は、不整地への高い適応能力を有する移動形態であり、階段のような既存のインフラを利用することが可能である。このため、2足ロボットは、人間の生活環境において効果的に活動できる存在として期待され、広く研究されている。しかしながら、現状では傾斜や凹凸、曲面のある不整地での活動は困難であり、不整地歩行の実現が求められている^{(1)~(5)}。

このような不整地では、着地地面の3次元形状を正確かつリアルタイムで把握することは困難である。センシング技術の発展により、地面の大まかな傾斜や高さを認識することが可能となっているが、速度や精度の点において課題が残されている。このため、想定した着地位置と実際の位置との間に偏差が生じ、支持脚切替時の過度な衝撃や不完全な着地によりロボットの姿勢が不安定となる。これらの問題を解決するため、着地時の衝撃抑制および着地位置の修正という二つの機能がロボットに求められる。

地面の凹凸や着地時の衝撃を吸収するため、ロボットの足底へゴム等の柔軟な緩衝材料を装着することが従来より広く行われてきた⁽⁶⁾⁽⁷⁾。しかしながら、この方法は、凹凸が微小な場合にのみ有効と考える。また、多くの研究ではこの柔軟材料の特性は制御系設計において考慮されていないため、過度に柔軟性を持たせた場合、ロボットの安定性に悪影響を及ぼす可能性がある。

未知の不整地への着地問題に対しては、橋本ら⁽⁸⁾⁽⁹⁾、中野ら⁽¹⁰⁾、中嶋ら⁽¹¹⁾によってコンプライアンス制御を用いる方法が提案されている。しかし、床反力のフィードバック信号のみを用いて制御を行う場合、着地時に生じるインパルス状の衝撃を抑えることは困難である。一方、各関節の角度制御ゲインの調整によってコンプライアンス制御を

* 原稿受付 2011年2月18日

^{*1} 豊橋技術科学大学 大学院 機械・構造システム工学専攻
(〒441-8580 愛知県豊橋市天伯町雲雀ヶ丘 1-1)

^{*2} 正員、豊橋技術科学大学 機械工学系
E-mail: sano@me.tut.ac.jp

Fig. 1 Biped robot

Fig. 2 Robot model

実現する方法では、衝撃緩和のため低ゲインとすることにより位置の制御性能が低下する。また、着地地面が想定よりも低い場合には、別の方法によって対処しなければならない。さらに、これらの制御法は、制御性能や安定性についての理論的な議論が十分でない。

著者らは、バネを有する点接触型足 (PCFS : Point-Contact type Foot with Springs) を提案し、この PCFS を用いることにより、不整地への柔軟な適応や安定接地、着地時の衝撃や外力の吸収が可能であることを示した⁽¹²⁾。さらに、PCFS によるロボットの姿勢および ZMP の推定法を示すとともに、対応可能な地形と姿勢の安定性を考慮した PCFS の設計法を提案した⁽¹³⁾。また、着地時の衝撃抑制のためのバネと力センサーを組み合わせた Sensor Unit、および高さ未知の地形に対するバネを有する足の着地制御法を提案し、その有効性を実験により明らかにした⁽¹⁴⁾。この提案する着地制御法の安定性と制御性能は、足に組み込まれたバネを考慮した着地モデルにより示された。提案する Sensor Unit を用いることで着地時の衝撃を抑制できるため、簡単な制御法であっても優れた着地制御性能が得られる。さらに提案法は、地面の弾性や粘性に対するロバスト性を有する。また、着地制御法と歩行パターンからなる歩行制御法を提案し、動力学シミュレータ OpenHRP⁽⁵⁾⁽¹⁵⁾を用いて、高さ未知の段差が連続する地面において有効性を明らかにした⁽¹⁶⁾。単純な構造の2足ロボットと歩行パターンを用いて従来困難であった環境下での安定歩行を実現した。

多くの2足ロボットは、様々な動作を行うために各脚に6自由度を有している。しかしながら、一般に自由度が多くなるほど重量の増加や構造や動作の複雑化、消費エネルギーの増大を招くため、必ずしも多くの自由度を有することが望ましいとは言えない。

本論文では、提案する着地制御法と歩行パターン生成器から成る歩行制御法を全体で6自由度の能動関節のみを有する2足ロボットへ適用し、高さ未知地形における有効性を実験的に検証した結果について述べる。実験により、簡単な構造の2足ロボットであっても安定歩行が実現できることを確認した。以下では、まず本研究で開発した2足ロボットについて述べる。次に、提案する着地制御法と歩行パターン生成について説明する。最後に、実験により有効性を検証した結果について述べる。

2. 実験装置

本章では、本論文の実験で用いた2足ロボットについて述べる。太田らの提案する省自由度2足ロボット⁽¹⁷⁾を参考に、能動関節が全体で6自由度の2足ロボットを開発した(図1)。このロボットの概略図を図2に示す。腰に2自由度、各足首に2自由度を有し、腰関節間の距離 $w = 0.22$ [m]、腰関節と足首関節間の距離 $h = 0.38$ [m]、足裏には直径 0.15 [m] の円板を用いており、質量は 4.7 [kg] となっている。構成フレームにはアルミ、足裏の円板には軽量にするためナイロンを用いた。従来の各脚に6自由度を有する構造に比べ単純であり、第4章で述べる簡単なパターンでも歩行可能である。

この2足ロボットの特徴は、各足に Sensor Unit と呼ばれる著者らの提案するバネと力センサーを組み合わせた装置を有することである。従来の2足ロボットの多くは足裏にゴムを取り付けることで着地時の衝撃抑制を図っていたが、著者らはバネを組み込むことでより効果的な衝撃吸収を実現する。また、力センサーは、バネ上部に隙間な

Fig. 3 Model of foot landing

Fig. 4 Landing motion

く設置され、着地制御のための反力測定に用いられる。これにより、単純な着地制御法であっても高い制御性能を得ることができる⁽¹⁴⁾⁽¹⁶⁾。なお、実験で用いた Sensor Unit のバネ定数は、5900[N/m] である。このバネ定数は、ロボットの重量が最大 6[Kg] になった場合でも、バネの変位量が Sensor Unit の最大変位量である 1[cm] 以内となるように決定した。なお、制御には、信号入出力ボードを搭載した標準的な PC (CPU : 3.0GHz Dual Core, OS : Windows 7) を用いている。

3. 着地制御法

高さが未知の地形への着地問題では、過大な衝撃力を発生させることなく実際の地面へと足先位置を修正することが重要である。すなわち、着地制御には、望ましい反力軌道への追従と位置の修正が求められる。これらの目的を達成するため、著者らは、バネを有する足のための着地制御法を提案し、その安定性と制御性能を解析的に明らかにした⁽¹⁴⁾。本章では、この提案する着地制御法について簡単に述べる。なお、本制御法は、ロボットの着地動作時にのみ用いることを想定している。

3.1 着地モデル

想定している地面 (以下、想定地面) と実際の地面 (実地面) とに高さの偏差が存在する着地について考える。制御系の設計およびその安定性を解析するため、図 3 に示す上下方向のバネのみを考慮した着地モデルを用いる。ここで、 m は足先の質量、 C_g , K_g は地面と足の間の仮想的な粘性係数と弾性係数、 K_f は足に取り付けられているバネの弾性係数である。また、 x_1 , x_2 は足先の位置と足のバネ上部の位置、 h は想定地面と実地面との偏差、 f は足裏から受ける反力である。未知の地形への着地において、着地後の制御系の安定性が主問題となるため、ここでは着地後の状態について考える。地面と足との相互作用を表すバネと足に取り付けられているバネの自然長をそれぞれ l_1 , l_2 とすれば、このモデルの運動方程式は次式で表される。

$$m\ddot{x}_1 + C_g\dot{x}_1 + K_g(x_1 - l_1 - h) - K_f(x_2 - l_2 - x_1) = 0 \quad (1)$$

$$f = -K_f(x_2 - l_2 - x_1) \quad (2)$$

なお、以下では、 h および K_g , C_g は未知であり、 f は力センサによって測定可能であると仮定する。

3.2 制御入力

本制御法は、図 4 に示すように足上部の位置 x_2 を制御入力とし、次式で与えられる。

$$x_2 = x_{2r} - K_P(f_r - f) - K_I \int_0^t (f_r(\tau) - f(\tau)) d\tau \quad (3)$$

ここで、 K_P , K_I は制御ゲイン、 x_{2r} は想定地面に対する足位置の目標軌道、 f_r は想定地面へ理想的な着地をした場合の反力に相当する目標反力であり、これらは与えられるものとする。足位置の目標軌道と目標反力は完全に独立ではないが、2つの目標足位置 x_{1r} と x_{2r} の関係を指定することで式 (2) より f_r を決定できる。本制御法は、反力の微分を必要としないためセンサノイズの影響が少なく、また、足先位置を制御入力とするためロボットの脚構造に依存しない。産業用ロボットでは一般的に各関節の角度制御により手先の高精度な位置決めが実現されており、本制御法においても足位置を制御入力とみなすことで、様々なロボットへの応用が可能となり実用上有用であると考えられる。例えば、膝関節を持たない図 1 の 2 足ロボットのみならず、図 4 に示す異なる構造のロボットにも実装可能である。

Fig. 5 Walking pattern

3.3 安定性および制御性能

本制御法では、制御ゲイン K_I, K_P が次式 (4) を満たすとき制御系が安定である⁽¹⁶⁾。

$$K_P > 0, K_I > 0 \quad (4)$$

さらに、上式の安定条件を満たすとき、地面の仮想弾性係数 K_g 及び仮想粘性係数 C_g によらず安定である。すなわち、段差高さのみならず特性パラメータが未知の地面に対しても安定な着地が可能である。

制御性能については、次式 (5) に示すように、足先が実地面位置 (想定地面と偏差 h だけ異なる位置) へ、反力 f が目標値 f_r にそれぞれ漸近的に収束することを明らかにしている⁽¹⁶⁾。

$$\begin{aligned} x_1(\infty) &= x_{1r}(\infty) + h, x_2(\infty) = x_{2r}(\infty) + h \\ f(\infty) &= f_r(\infty) \end{aligned} \quad (5)$$

4. 歩行パターン生成

本章では、実験で用いた歩行パターンについて述べる。本歩行パターンは、図 5 に示すように次の 5 つの Phase から成り、これらの Phase は歩数だけ繰り返される。

1. Shift phase : 支持脚側へロボットの重心を移す。
2. Lift phase : 遊脚を地面から上げる。
3. Swing phase : 支持脚側の足首関節を垂直軸周りに回転させ、遊脚を前方に振り出す。
4. Landing phase : 遊脚を想定地面の高さまで降ろす。
5. Return phase : 支持脚側からロボットの中心へと重心を戻す。

なお、歩行中は Shift phase と Return phase が連続的に行われる。支持期開始から遊脚期終了までの歩行周期は 12[s] である。不整地歩行における実時間での動的な目標重心軌道の変更および修正は重要な課題であるが、本論文では提案する着地制御法の有効性検証に焦点を当てるため、アクチュエータの性能を考慮しロボットの重心移動を低速なものとした。この歩行において、大部分の時間は重心移動に費やされており、着地期間は 1 秒のみであるため、重心移動期間の時間短縮によって歩行の高速化が可能であると考えられる。

提案する着地制御法は Landing phase のみにおいて行われ、着地時の衝撃を抑制するために、式 (3) により目標足位置を修正する。ロボットの重心は、腰リンクの中心にあると仮定し、重心位置および遊脚の足上げ高さを用いて逆運動学を解くことにより関節の目標角度を求めている。各関節は、PID 制御により目標角度へ追従するように制御される。また、足首の垂直軸周りの目標角度は始点と終点での角速度と角加速度が 0 となるように、それ以外の各関節の目標角度は始点と終点での角速度が 0 となるように正弦波を用いてサンプリング時間毎に生成した。これは、重心移動においては始点と終点の角速度のみを 0 とすることで最大加速度の大きさを抑え、一方で、遊脚の振り出し動作においては始点と終点の角加速度も 0 とすることで足裏が滑ることを防ぐためである。

Fig. 6 Walking experiment with an unknown bump (0.02m)

5. 実験

提案法の有効性を確認するため、第3章で述べた2足ロボットを用いて実験を行った。この実験では、ロボットの進行方向の地面上に未知の段差を設置し、提案する歩行制御法を検証した。未知の段差として、厚さ2cmおよび1cmの木材のほか、地面の粘弾性パラメータに対するロバスト性を検証するため厚さ1cmの木材上に厚さ1cmのフローリング用マットを貼り付けたものを用意し、これら計3種類で実験を行った。着地制御の目標反力軌道は、平らな地面上での足踏み実験から得られた反力軌道を元に、着地開始後0.75[s]から0.15[s]で最大反力5[N]まで線形に増加し、その後一定値となるように設計した。歩行動作および着地制御のサンプリング周期を10[ms]とした。着地制御は、着地開始から完了までの着地期間1[s]のみにおいて行われる。

着地制御ゲイン K_p , K_I を実地面が想定より高い場合と低い場合で切り替えており、高い場合(High)は $K_p = 0.5 \times 10^3$ [m/N], $K_I = 15 \times 10^3$ [m/Ns], 低い場合(Low)は $K_p = 0.5 \times 10^3$ [m/N], $K_I = 26 \times 10^3$ [m/Ns]とした。このゲインの切り替えは予め設定しておくのではなく、想定着地時間(着地開始から0.75[s]後)以前に反力を観測した場合はHigh, それ以外の場合をLowとして切り替えた。これは、想定よりも低い場合には制御時間内に実地面へと着地する必要があるため大きな修正量が必要になるのに対し、想定よりも高い場合には過大な修正が加わると足が地面から浮いてしまうためである。これらのゲインは、次のような数回の実験から決定した。2足ロボットに足踏みをする動作軌道を与え、最初に足を上げたときに厚さ約2.5cmの板を着地位置に設置する。ゲインが小さい場合には、提案法による着地位置の修正が不十分となり、安定した足踏み動作を継続できない。また、式(2)により足に取り付けたバネの弾性係数 K_f と計測した反力 f からバネ変位($x_2 - l_2 - x_1$)が推定できるが、提案法による位置の修正量($x_{2r} - x_2$)

Fig. 7 Walking control results with an unknown bump (0.02m thick wood plate)

Fig. 8 Walking control results with an unknown bump (0.01m thick wood plate)

Fig. 9 Walking control results with an unknown bump (0.01m thick mat on 0.01m thick wood plate)

がこの推定バネ変位よりも大きな場合には、過剰な修正となり足が浮いてしまうことが予想される。このことと制御入力式 (3) より、比例ゲイン K_P はバネ定数 K_f の逆数よりも小さくするべきであることが分かる。以上のことを考慮し、適切な修正量が得られるゲインを決定した。提案法による修正量を強制的に推定バネ変位以下にすることで、過剰な修正を抑えることも可能であるが、本実験では行っていない。

図 6 に実験動作の一例を示す。段差は 1 歩目の着地位置に配置されているため、1 歩目の着地では実地面は想定よりも高く、2 歩目では想定よりも低くなる。最後の 3 歩目では想定と実地面の高さは等しくなる。

図 7 - 9 に 3 種類の未知段差に対する歩行制御の結果を示す。(a) は Sensor Unit により観測された反力であり、実線は右足、破線は左足における反力である。(b) は着地制御期間における反力の追従誤差、(c) は着地制御による着地高さの修正量 ($= x_{2r} - x_2$) を示している。まず、図 7(c) および図 8(c) から、提案法により着地高さの修正量が理論値である実際の段差高さに良好に収束していることが分かる。また、図 9(c) において、着地地面が柔らかいマットであっても安定した位置の修正が実現されている。修正量が理論値に届いていない理由は、マットが柔らかく足が沈み込むためである。全体の傾向として、実地面が想定よりも低い場合において、切り替えによりゲインが高く設定されるため修正量や反力が振動的である。また、図 7 - 9(b) において、想定よりも実地面が高い場合の左 (3.5 - 4.5[s])

では反力の追従誤差が0付近へ収束しているのと比べ、中央(9.5 - 10.5[s])では収束性が悪い。これは、着地制御の期間が各1[s]と固定されているため、実地面が想定よりも高い場合にはその偏差が大きいほど着地後の制御可能時間が長くなるのに対し、低い場合には偏差が大きいほど時間が短くなるためである。実際、段差が2cmの木材の場合において、高い場合ではおよそ制御可能時間が400[ms](着地動作開始後およそ0.6[s]で着地)であるのに対し、低い場合では100[ms]以下しかない(着地開始後およそ0.9[s]で着地)。この問題を解決するためには、反力の誤差がしきい値に収まるまで次のPhaseに移行しないなどの方法が考えられる。このように、階段の昇降など大きな段差に対処するためには、人間が暗闇の中で階段を昇降する場合と同様に、ゆっくりとした慎重な動作にならざるを得ない。そのため、距離センサやカメラなどにより大まかな想定地面の高さを推定し、その想定地面と実地面の高さ偏差を本着地制御法で修正することが望ましいと考える。反力誤差は最大約5[N]に達するが、この追従誤差は主にロボットの機械的ガタに起因している。また、ロボットの総質量は4.7[Kg]であるため、ロボットの転倒に影響がないほど十分小さいと考える。

床が完全に平らではないため、想定と実地面の高さが等しくなる15.5 - 16.5[s]においても微小な修正量が発生している。また、図6(i)において、床のうねりにより支持脚足裏がわずかに浮いている。本研究で用いた2足ロボットおよび着地制御法では、足裏の姿勢を実地面へと修正できない。この未知の傾きを有する地形での安定歩行を実現するため、著者らの提案するPCFS⁽¹²⁾を用いたロボットの製作と制御法の提案を今後の課題とする。

6. 結 言

従来の着地制御法では、想定する着地地面と実際の地面との偏差が大きい場合、着地時のインパルス状の衝撃を抑えることが困難であった。また、着地制御系の安定性や制御性能に関する理論的な議論が十分になされていなかった。提案法は、その制御系の安定性が理論的に保証されているとともに、足先位置を制御入力とし、反力の微分情報を必要としないため、反力センサノイズの影響が少なく、またロボットの脚構造に依存しないため容易に実装可能である。本研究では、高さおよび粘弾性の異なる3種類の段差に対して提案法を検証し、高さ未知の段差が存在する地面での安定した2足歩行を実現した。また、従来のように片脚に6自由度を持つ複雑な構造ではなく、全体で6個のアクチュエータのみを持つ2足ロボットを用いているため、コスト面でも優位であると考えられる。今後の課題として、歩行の高速化と、傾きも未知なより複雑な地形における安定歩行実現のための、PCFSを有するロボットと制御法の提案が挙げられる。

謝 辞

本研究にご支援いただいた財団法人堀科学芸術振興財団に対し御礼申し上げます。

文 献

- (1) 庄司 道彦, 王 志東, 高橋 隆行, 中野 栄二, “二脚ロボットの佇立能力向上のための足構造”, パイオメカニズム学会誌, Vol. 25, No. 1 (2001), pp. 36-42.
- (2) 藤井 淳, 高橋 良彦, “着地制御ロボットに関する研究”, 日本機械学会関東支部総会講演会講演論文集, No. 12 (2006), pp. 289-290.
- (3) 梶田 秀司, 谷 和男, “実時間路面形状測定に基づく動的2足歩行の制御”, 日本ロボット学会誌, Vol. 14, No. 7 (1996), pp. 1062-1069.
- (4) 梶田 秀司, 谷 和男, “線形倒立振子モードを規範とする凹凸路面上の動的2足歩行制御”, 計測自動制御学会論文集, Vol. 31, No. 10 (1995), pp. 1705-1714.
- (5) Hirukawa, H., Hattori, S., Kajita, S., Harada, K., Kaneko, K., Kanehiro, F., Morisawa, M., and Nakaoka, S., “A Pattern Generator of Humanoid Robots Walking on a Rough Terrain”, *Proc. 2007 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, (2007), pp. 2181-2187.
- (6) Kaneko, K., Kanehiro, F., Kajita, S., Hirukawa, H., Kawasaki, T., Hirata, M., Akachi, K., and Isozumi, T., “Humanoid Robot HRP-2”, *Proc. 2004 IEEE Int. Conf. on Robotics and automation*, Vol. 2 (2004), pp. 1083-1090.
- (7) 山口 仁一, 木下 昇, 高西 淳夫, 加藤 一郎, “路面形状に偏差のある環境に対する適応能力を持つ2足歩行ロボットの開発”, 日本ロボット学会誌, Vol. 14, No. 4 (1996), pp. 546-559.

- (8) 橋本 健二, 菅原 雄介, 川瀬 正幹, 林 昭宏, 田中 智明, 太田 章博, 沢戸 瑛昌, 遠藤 信綱, 林 憲玉, 高西 淳夫, “ 着地軌道修正制御と推定姿勢補償制御による人間搭乗型 2 足歩行ロボットの屋外歩行の実現 ”, 日本ロボット学会誌, Vol. 25, No. 6 (2007), pp.851-859.
  - (9) 橋本 健二, 菅原 雄介, 砂塚 裕之, 田中 智明, 太田 章博, 川瀬 正幹, 林 憲玉, 高西 淳夫, “ 脚部にパラレルリンク機構を用いた 2 足ロコモータの開発 (第 9 報: 非線形コンプライアンス制御を用いた着地軌道修正法と不整地歩行の実現) ”, 第 23 回日本ロボット学会学術講演会, (2005), 1G26.
  - (10) 中野 栄二, 小森谷清, 米田完, 高橋隆行, “ 高知能移動ロボティクス ”, 講談社, (2004), pp.153-170.
  - (11) 中嶋 秀朗, 中野 栄二, “ 脚車輪分離型ロボットの大不整地適応歩容 (第 2 報, 段差上り歩容編) ”, 日本機械学会論文集 C 編, Vol. 72, No. 721 (2006), pp. 2932-2939.
  - (12) Sano, S., Yamada, M., Uchiyama, N., and Takagi, S., “Point-Contact Type Foot with Springs and Posture Control for Biped Walking on Rough Terrain”, *Proc. IEEE Int. Workshop on Advanced Motion Control*, (2008), pp. 480-485.
  - (13) Yamada, M., Maie, H., Maeno, Y., Sano, S., and Uchiyama, N., “Design of Point-Contact Type Foot with Springs for Biped Robot”, *Proc. 2010 IEEE/ASME Int. Conf. on Advanced Intelligent Mechatronics*, (2010), pp. 806-811.
  - (14) 山田 萌, 佐野 滋則, 内山 直樹, 高木 章二, “ 不整地歩行のための高さ未知の地形に対するバネを有する足の着地制御法 ”, 日本ロボット学会誌, Vol. 28, No.9 (2010), pp. 79-85.
  - (15) Morisawa, M., Harada, K., Kajita, S., Kaneko, K., Kanehiro, F., Fujiwara, K., Nakaoka, S., Hirukawa, H., “A Biped Pattern Generation Allowing Immediate Modification of Foot Placement in Real-time”, *Proc. IEEE-RAS Int. Conf. on Humanoid Robots*, (2006), pp. 581-5862.
  - (16) Yamada, M., Sano, S., and Uchiyama, N., “Walking control on unknown and uneven terrain for biped robot with spring embedded feet”, *Proc. 13th Int. Conf. on Climbing and Walking Robots and the Support Technologies for Mobile Machines*, (2010), pp. 557-562.
  - (17) Ota, Y., Tamaki, T., Yoneda, K., and Hirose, S., “Development of Walking Manipulator with Versatile Locomotion”, *Proc. 2004 IEEE Int. Conf. on Robotics and automation*, Vol. 1 (2003), pp. 477-483.
-