脚式レスキューロボットの瓦礫上歩行 — 地面認識と転倒安定性を考慮した歩行戦略 —

学 藤本浩之 ○正 徳田 献一 (和歌山大学)

Rubble walking by regged lescue robot – Walker strategy in consideration of groud condition and tumble stability

Hiroyuki FUJIMOTO, *Kenichi TOKUDA, (Wakayama Univ.)

Abstract—Rescue Robot RoQ is rumble walking robot. Walking robot thinks about "Tumble Stability" for the posture control."Tumble Stability" is effective on the ground without limits of durability. Usually, the ground has load limits in the disaster area. This report proposes "Tumble Stability" that considered durability of the ground.

Key Words: rescue robot, RoQ, posture control

1. はじめに

自然災害や人的被害における被災地においてレスキュー作業を支援するロボットとしてレスキューロボット RoQ の研究を行っている。災害現場においてレスキュー活動を行う際、歩行ロボットは瓦礫上などの不整地を踏破することが必要である。しかし災害現場では傾斜や障害物だけでなく、破損、変形するといった倒壊するおそれのある足場が存在し、ロボットが歩行するのは困難である。そこで我々は人間がそういった環境時を歩行する際に行う足探り動作に着目し、ロボットに足探り動作を行わせることで足場の状態を認識し、歩行に適した足場を選択することで不整地歩行を目指している。ロボット歩行の安定性の指標として従来から転倒安定性というものが考えられているが、倒壊する、破損するといった足場での安定性への適応は困難であると考えられる。本稿では負荷荷重への耐久性の異なる足場において支持脚にかかる床反力を考慮した姿勢安定化、およびそれを用いた歩容生成について述べる。

2. 転倒安定性と足場推定

2.1 転倒安定性

歩行機械において歩行時の安定性の考えとして転倒安定性¹⁾が存在する。ロボットの動作環境の床が水平であり、支持脚が床から得られる反力が鉛直上向きで制限なく付加をかけることができる安定した足場である場合、重心の床面への投影点が支持脚の成す多角形内に存在すれば、転倒することなく安定であるというものである。そしてその指標として支持脚多角形の辺との最短距離を転倒安定余裕と定義し (fig.1), 次の式で表される。

Tumble Stability Margin

$$= \frac{\min \left| \overline{M} \cdot \frac{(p_a - p_b)}{|p_a - p_b|} + \overline{F} \cdot \frac{(p_b \times p_a)}{|p_a - p_b|} \right|}{mg}$$

Figure 1. Tumble Stability Margin

ロボットの身体性を考えず、足それぞれにかけることのできる荷重に制限が存在しない場合、多角形内のどの位置であってもロボットは安定する。また重心位置と多角形の境界線との距離を大きくすることで安定性の向上をはかることが可能である。しかし実際に支持脚を接地する足場がすべて安定である補償はなく、一定以上の荷重を加えれば倒壊する足場など、荷重の大きさによる制限が発生する。その場合、姿勢の安定する重心位置が支持脚多角形内にあればよいということが成立しない。

2.2 足場推定

レスキューロボット RoQ 足探り動作を行わせることで足場の状態の推定を行っている。ここでの足探り動作とは足を踏み込む、ずらす (床面に水平に動かす)、足場に沿って傾けるという3つの動作のことである。この足探り動作による足裏センサのデータの変化から足場の状況の推定を行っている。実際に使用している

足裏センサの概略を次に示す。足裏センサは FSR と呼ばれる感圧抵抗素子を 4 つ対角線上に配置したもので、各 FSR の抵抗値の変化から足裏にかかる荷重と荷重のかかっている中心位置 COF(center of force) の計測を行うものである (fig.2)。

Figure 2. sole sensor

この足裏センサを用いて行う足探り動作から判断可能な足場の状況として以下のようなものがあげられる 4)。

- 丈夫で水平に安定した足場
- 丈夫であるが不安定
(ある一定以上の荷重をかけると傾いてしまう足場)
- 丈夫であるが不安定
(ある一定以上の荷重で踏み込むと崩れる足場)
- たわむ (しなる) が安定した足場
(ある荷重以上で壊れる)
- 柔らかいが安定する丈夫な足場 (崩壊しない足場)
- 柔らかく、ある一定の荷重で崩壊する足場
- 傾いている足場
- 段差の存在する足場

本稿においては判断可能とする足場のうち、荷重の大きさによって足場として利用不可能になる足場 (丈夫であるが壊れる足場、しなる足場、やわらかい足場) について考える。

3. 足場の耐久性を考慮した姿勢制御

被災地における瓦礫上歩行では、足場の倒壊や崩落の危険性を考える必要がある。そのためにはすべての足場に荷重を加えた場合の耐久性 (どれだけの荷重であれば足場として利用できるか) を考慮する必要がある。そこで各支持脚にかかる床反力を考慮した転倒安定性を提案する。前節で述べたようにここでは次のように足場にかかる荷重の範囲に制限を加えることにする。壊れる、しなる足場には許容荷重の最大値 F_{max} を、やわらかい足場には足場として機能するために必要最小荷重 F_{min} および許容最大荷重 F_{max} を設定する。

3 脚支持状態において脚 A, B, C それぞれにかかる床反力を F_a , F_b , F_c とし、次のような制約がかかるとする。

$$\cdot a_1 F_a \leq F_a \leq a_2 F_a$$

$$\cdot b_1 F_b \leq F_b \leq b_2 F_b$$

$$\cdot c_1 F_c \leq F_c \leq c_2 F_c$$

この場合、ロボットの姿勢の安定する重心位置は以下の図のように制約をうける。 ($a_1 = 0$, $b_1 = 0$, $c_1 = 0$)

Figure 3: Area of center of gravity(Think durability of ground)

この重心位置の存在可能な領域の面積を安定性の指標とする。この面積が大きいほど、歩行は安定するといえる。また存在可能領域の境界線から重心位置までの距離を足場の安全を保有した安定余裕として用いることとする。

この足場の耐久力の制約によって従来の転倒安定性に比べて、ロボットの安定する重心範囲は制限されることとなるが、範囲内に重心が存在する場合においては足場の耐久性を考慮する必要がなくなる。

以上の足場の耐久性を考慮した上で、姿勢安定化を使用した歩行動作について考えることができる。不整地歩行においてはロボットは足場を足探りし、足場の耐久性を判断したのちに足を地面に接地するため、動歩行ではなく静歩行となる。

そこでロボットの重心位置を足場の耐久性を考慮した安定領域に置く歩容を行う。脚移動前後の安定領域で共通する範囲を重心にたどらせることにより (fig.4), 足探りによって耐久性を得て以後、足場の耐久性を考慮する必要がなく、不安定な足場であってもスムーズな歩行を行うことが可能である。

Figure 4. Example of gait pattern(durability of ground)

4. シミュレーション実験

レスキューロボット RoQ に提案した歩容生成を導入し行ったシミュレーション動作実験について述べる。

4.1 動作環境

動作実験は次のような環境を用いて行った。

- 歩行には静歩行を用いて行う。
目標とする動作環境において足場の崩壊などの危険性、および足場推定のための足探り動作を考慮し、静歩行を行う。
- 3脚支持状態で動作を行う。
遊脚交換時を除き、重心移動などの動作は3脚支持状態で行う。
姿勢の安定性を考えた場合、重心移動時には4脚支持状態が望ましいが、重心移動時の足場にかかる荷重を結果の焦点とするため敢えて3脚支持での動作を行う。
- 支持脚の接地する地面は水平であり、安定した足場を用いる。
本実験では足場としては水平で安定した足場を用いる。実際には変形や崩壊する可能性のある足場を用いて実験を行うことが理想であるが、足裏センサにより足場にかかる荷重を計測し、荷重限界と比較することで変形や崩壊の判断を行う。
- 足場の耐久性はあらかじめわかっている。
本実験では足場の耐久性をあらかじめ設定する。実際には足探りを行い、その結果により着地点を選定することが望ましいが、安定した足場での実験であるため足探り動作を行わない。代わりに着地点候補の中から有効な足場を選択し、動作を行う。

足の到達可能範囲内の数カ所の脆弱性を足探り動作によって判別する。その後、その点を支持脚としたときに重心が存在することのできる範囲を計算する。数カ所のうちから範囲面積の広い箇所を選択し、重心を

存在可能範囲において安定度の高い場所を辿らせる。ここでの安定度の高い場所とは、重心の存在可能領域の各境界線からできるだけ距離をとった位置である。

動作方法は制約された範囲内に重心を置きながら進行方向へ移動させていき、次の状態の制約範囲内に重心が移動したところで遊脚の交換を行う。今回のシミュレーションには足探り動作は含んでおらず、あらかじめ設定した荷重範囲、支持脚の位置を用いたシミュレーションである。重心の移動は制約範囲内で比較的安定する中央付近を進行方向へ移動させている。

4.2 シミュレーション結果

Situation 1 :限界荷重が存在する場合

すべての支持脚の足場に限界荷重がある場合のシミュレーションを行った。各支持脚の荷重範囲は Table 1 のように設定し、状態 1～3 までの動作について確認した。

Table 1. Simulation parameter

	<i>Leg1</i>	<i>Leg2</i>	<i>Leg3</i>	<i>Leg4</i>
State 1	$F_1 \leq 14$	FREE	$F_3 \leq 15$	$F_4 \leq 12$
State 2	$F_1 \leq 14$	$F_2 \leq 10$	$F_3 \leq 15$	FREE
State 2	$F_1 \leq 14$	$F_2 \leq 10$	FREE	$F_4 \leq 10$

遊脚以外の足にかかる荷重はそれぞれ変化しているが、あらかじめ設定した範囲を超える荷重はかかっていない。よって範囲内に重心を置くことで足場にかかる荷重は範囲内制約することができ、崩壊の危険性のある足場にも対応することができる。また足探り動作や遊脚交換の際にも、支持脚に余計な負荷をかけることなく、安定して行うことができることを示した。

Situation 2: 必要荷重が存在する場合

次に必要荷重の存在する環境を考える。各支持脚の足場の荷重制限を Table 2 のように設定し、同様にシミュレーションを行った。

Table 2. Simulation parameter

State	<i>Leg1</i>	<i>Leg2</i>	<i>Leg3</i>	<i>Leg4</i>
1	FREE	$0 \leq F_2 \leq 13$	$3 \leq F_3 \leq 15$	$0 \leq F_4 \leq 12$
2	$4 \leq F_1 \leq 14$	$0 \leq F_2 \leq 13$	FREE	$0 \leq F_4 \leq 12$
3	$4 \leq F_1 \leq 14$	$0 \leq F_2 \leq 13$	$0 \leq F_3 \leq 10$	FREE

必要荷重および限界荷重が共に存在する場合であっても、その制約範囲を超える荷重がかかっていないことがわかる。重心の移動可能範囲が制約されるのみで特に問題なく動作を行うことができる。

Situation 3 :

次に足場を1マス0.5m四方単位に限定、荷重限界を設定したフィールドを用いて動作シミュレーションを行った。

足の設置場所をマスの中心とし、足の到達範囲から有効な足場を選択し、歩行動作を行った。

実際の重心の移動をFig.5のように表した。

Fig.5. State 2

重心移動時に各支持脚の足場にかかる荷重の変化をFig.6に示す。

Fig.6. Simulation data (State 1 - State 2)

無作為に作成した足場環境であっても歩行シミュレーションを行うことができた。

足場にかかる荷重も制限内であるため、このアルゴリズムをRoQに導入することで動作を行うことが可能であると考えられる。

4.3 評価

足場の耐久性をあらかじめ計測し、各足場の耐久性に合わせて重心の移動領域を設定することで、荷重の大きさで変形や崩壊する可能性がある足場であっても、限界値を超えることなく歩行動作を行うことが可能であることを示すことができた。これにより荷重を加えることによる足場の性質変化をあらかじめ防止するこ

とが可能であり、それによって起こる転倒やバランスを崩すといった危険性がなくなると考えられる。

しかし足場への荷重の許容範囲がロボットの重量の半分以上となる場合では、歩行動作を困難となる可能性があるため、足場選択の際にはそれを考慮する必要があると考えられる。

5. おわりに

本研究では、被災地などにおけるレスキュー作業を支援するレスキューロボットとして、瓦礫上踏破を目的とした歩行ロボットの開発を目指し、これまで足場選定のためにレスキューロボットRoQを用いた足探りにより、足場の性質の推定を行ってきた。

本報告では足場推定によって得られる足場の耐久性に着目し、それを考慮した姿勢制御、および歩容生成を提案した。被災地などの瓦礫環境に存在し、歩行時に問題となる荷重を加えることで変形したり、崩壊するなど耐久性を持つ足場に適応するための歩容生成を提案し動作シミュレーションを行った。

支持脚の足場が水平であるとき、ロボットの支持脚着地点の耐久性を考慮し、重心の存在可能範囲を制約することで、限界以上の荷重を足場へかけることなく瓦礫上歩行を行うことが可能である。

今後、実機実験を含め、傾斜などの足場などに対応していくことで、被災地などの複雑な瓦礫上での歩行の実現を目指す。

参考文献

- 1) 米田完, 広瀬茂男, 歩行機械の転倒安定性, 日本ロボット学会誌, Vol. 14, No. 4, pp. 517-522, (1996)
- 2) 徳田献一, 田所諭, 昆陽雅司, 戸田崇文, 穂幸久, 渡辺景子, レスキュー作業を目的としたロボティックプラットフォームRoQのアーキテクチャ, 第46回システム制御情報学会研究発表講演会, pp.169-170, (2002)
- 3) Kenichi TOKUDA, Takafumi TODA, Yoshihisa KOJI, Masashi KONYO, Satoshi TADOKORO, Estimation of fragile ground by foot pressure sensor of legged robot, Proc. of the 2003 IEEE/ASME AIM2003, pp.447-453, (2003).
- 4) 藤本浩之, 徳田献一, 田所諭, 安田一則, レスキューロボットRoQによる瓦礫上歩行 - COFを用いた足場形状推定 - 第6回計測自動制御学会SI部門学術講演会 (SI2005), 1F1-2, (2005)