

不整地における歩行機械の静的安定性評価基準

広瀬茂男* 塚越秀行* 米田完*

Static Stability Criterion for Walking Robots on Irregular Terrains

Shigeo Hirose*, Hideyuki Tsukagoshi* and Kan Yoneda*

We discuss some suitable stability margin concepts for walking robots which are expected to walk around on irregular terrains. Several stability margin ideas have been proposed before, but those can be roughly divided into three kinds. We came to the conclusion that a stability margin concept based on energy considerations is the most practical to adopt and that its validity could be recognized through simple experiments. But the existing energy stability margin is inadequate for practical use because this margin varies with the weight of the robot which can't affect its resistance to tumbling caused by slipping from steps or the sudden stop. Therefore, we'll propose an improved one here, called the normalized energy stability margin, the NE stability margin for short. Considering this margin, we'll introduce a novel tool called the S_{NE} contour which connects the points on the slope which have the same NE stability margin, so as to derive a stable gait for walking robots. In the final part of this paper, we focus on the features of the S_{NE} contour which shed new light on the solution for the stable posture.

Key Words: Walking Robots, Stability Margin, Normalized Energy Stability Margin, S_{NE} Contour

1. まえがき

歩行機械は、平地においては移動効率が車輪型やクローラ型よりも劣るもの、安定な接地点を離散的に選択して歩行するため不整地においても安定な移動ができる、また静止時には脚によって転倒しにくい姿勢をとることで安定な作業の足場を構成できる、などのいくつかの特異な機能性を有する。そのため、従来からの車輪型移動機械では推進が困難であるような不整地を縦横無尽に動き回り、移動のみならず種々のハンドリング作業を遂行するシステムに展開しようとする研究がいくつか行われるようになっている。筆者らも現在、凹凸や急斜面のあるような土木現場において安定な走行と作業を行う歩行機械の開発を行っている[1]。Fig. 1 はその4足歩行型プロトタイプモデル TITAN VII であり、これが斜度30度の斜面を歩行している様子である。

さて、このような傾斜面を含む不整地を歩行する歩行機械の歩容を考えていく場合、まず始めに考慮しなければならない条件は、どのような歩行面でも安定で転倒しない歩行を持続できる特性を与えることである。そして、そのためには不整地環境で任意の立位姿勢をなしている歩行機械の静的安定性について合理的な評価基準を定めた上で、その評価量を最大化する歩容

生成が不可欠となる。もちろんこれまでにも、歩行機械の静的安定性評価基準に関してはいくつかの報告がなされている[2]~[7]。しかし、それぞれの評価量を最大化することによって得られる歩行機械の相異なる姿勢が、物理的にどのような相違点をもたらすことになるのか比較し検討されたことはなかった。そこで本研究では、不整地環境にある多足歩行機械が静的安定性を最大限維持するための評価基準を相対的に検討し、新たに「正規化エネルギー安定余裕」と呼ぶ安定性評価基準を提案する。次にその評価量の最大化を図った姿勢と歩容生成を検討するため「 S_{NE} 等高線」の概念を導入し、不整地における一般歩行機械の歩容計画の基礎を構築することにする。

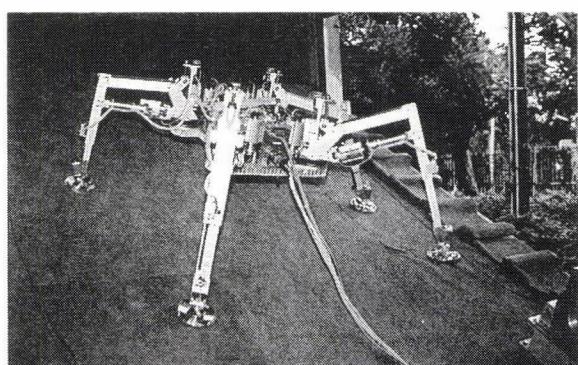


Fig. 1 TITAN VII walking on the slope

原稿受付 1997年8月6日

*東京工業大学

*Tokyo Institute of Technology

2. 静的安定性評価基準の総合的検討

不整地環境にある多足歩行機械の静的安定性を最大化する問題を考えていくためには、まず始めに安定性評価基準を明確化しなければならない。静的安定が崩れる原因には、「転倒」と「滑落」が考えられる。このうち、滑落は脚支持面の摩擦係数などに依存する現象である。滑落を防止する条件を探ることはもちろん重要であり今後考察していくことが必要であるが、本研究ではひとまず足裏にはバイクなどがあつて接地面との摩擦係数は十分大きく「滑落」は起きにくいという状況を想定し、「転倒」の効果のみを考察していくこととする。

歩行機械の転倒安定性の評価基準は、これまで個別にいくつもの提案がなされてきたが、その特性を総合的に比較検討することは行われていなかったと思われる。そのため本研究では、簡単な転倒実験を含めた考察によってそれらを比較し、最も適する評価基準を新たに提案することにする。

2.1 従来の安定性評価の分類

これまで、歩行機械の転倒安定性の評価基準としては以下の六つが提案されていたと考えられる。

1) 「安定余裕 (Stability Margin)」[2]。これは、歩行機械が水平で平坦な地表面を歩行しているとしたとき、歩行機械の重心から地表面へ下ろした垂線の足を重心投影点としたとき、その重心投影点から支持脚によって地表面に形成される支持多角形の境界線への距離である。

2) 「転倒安定余裕 (Tumble Stability Margin)」[3]。これは、歩行機械の支持脚のうち任意の二つの支持脚接地点を結ぶ軸回りに転倒が生ずると考えた際、その軸周りに歩行機械の重量が発生する転倒防止方向のモーメントの絶対値を歩行機械の重量で割った長さの次元の評価量である。これは、歩行機械が水平で平坦な地表面を歩行している状況に限定すると 1) の安定余裕と同じ評価基準となる。

3) 「傾斜度安定余裕 (Gradient Stability Margin)」[4]。これは、歩行機械が立っている環境全体を任意の方向に傾斜していったとき、歩行機械が転倒を始める傾斜角によって安定性を評価しようとするものである。

4) 「Tipover Stability Margin」[5]。これは概念的には傾斜度安定余裕と等しいが、倒れる要因を重力だけでなくすべての外力を含めて考慮しながら倒れ始める限界角度によって安定性を評価しようとするものである。

5) 「Energy Stability Margin」[6]。これは、歩行機械の支持脚のうち任意の二つの支持脚接地点を結ぶ軸回りに転倒が生ずると考えた際、転倒の過程で重心が持ち上げられる位置エネルギーの大きさによって安定性を評価するものである。

6) 「Dynamic Energy Stability Margin」[7]。これは概念的には Energy Stability Margin と等しいが、重力だけでなくすべての外力を含めて安定性を評価しようとするものである。

なお、以上すべての評価において、ある瞬間の姿勢における歩行機械の安定性は、通常その姿勢で考えられるすべての方向(ヨー角方向)への転倒の評価値の最小値によって与えるのが普通である。

さて、これらのうち 1) 「安定余裕」の概念は、移動体が水平

面上に立っているという姿勢を前提として提案された安定性評価である。そのため、これを不整地傾斜面を歩行するような歩行機械の安定性評価にそのまま使用しようとすると、若干の矛盾が生じてしまう。例えば Fig. 2 (1) のように不整地歩行の特例として傾斜面に立っている歩行機械を考えよう。この歩行機械の重心位置は斜面から一定の高さの任意の位置に保持するものとする。このとき「安定余裕」の観点から最も安定と考えられる重心位置は、Fig. 2 (2) のように重心を前後脚の真中に保持するものとなる。しかし Fig. 2 (2) の重心位置は、重力が上側(右側)と下側(左側)の支持点周りに発生する安定保持モーメント(M_g)は等しくその最低値は最大化できるが、重心に横方向に働く外乱で転倒させようとする支持点周りの転倒生成モーメントは、上側(右側)(M_{d1})と下側(左側)(M_{d2})とで同じではない。Fig. 2 (2) の例では明らかに下側(左側)の脚周りの転倒生成モーメントの方が大きく下側に転倒しやす

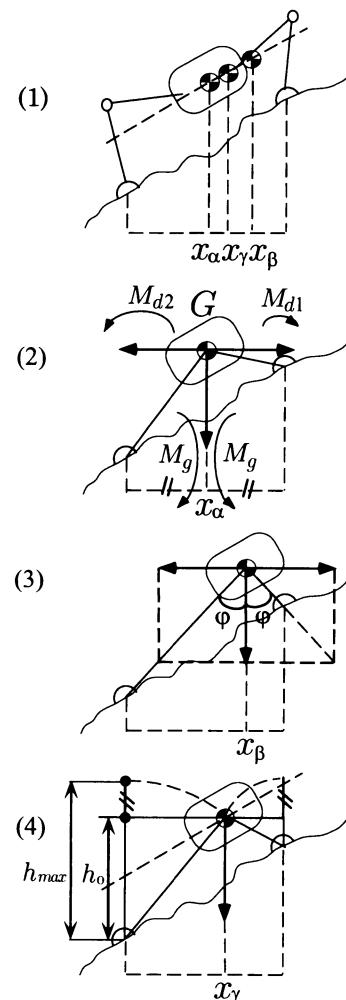


Fig. 2 The relationship between the posture and stability criterion

- (1) The walking vehicle under consideration
- (2) Posture to maximize the Stability Margin
- (3) Posture to maximize the Gradient Stability Margin
- (4) Posture to maximize the Energy Stability Margin

い。つまり「安定余裕」は支持脚の接地高さが異なると正しく安定性を反映しない。

外乱により転倒生成モーメントが異なるのであれば、それに比例した安定保持モーメントを生じる姿勢をとれば安定性は向上する。このような姿勢は重心に加わる左右方向への外乱力と重力との合力が左右とも支持点を通る状態であり、これはFig. 2 (3) の姿勢となる。なお、この姿勢は別の表現で示すと、歩行機械を載せた不整地を全体に傾けていったときにどの角度まで傾けると転倒を開始するかという評価と結果的には同じになる。そのためこれは3) の「傾斜度安定余裕」に対応したものであることが分かる。

「傾斜度安定余裕」は、例えば自動車などの車両の安定性評価などにも実際に使用されており具体的な実績のある評価基準である。しかし実際の移動状況を考えるとこの評価基準にも矛盾が残されている。歩行機械が歩行中に小さな凹凸を踏み外した場合を考えよう。この際には瞬間に横方向に大きな加速度が生ずる。外乱加速度とそれによって生ずる外乱力がこのようにインパルス的であれば、歩行機械は支持脚周りに一瞬浮き上がったとしても、すぐにもとの姿勢に復帰し完全に転倒しないはずである。しかし、その瞬間の傾斜度安定余裕は明らかに一時的に負になり、傾斜度安定余裕の意味からは転倒しなければならないことになる。したがって瞬間に大きい外乱インパルスが加わる場合には「傾斜度安定余裕」は不適と考えられる。

このような観点から、転倒の現象を瞬間的な力の方向で扱うのではなく、外乱として働く「エネルギー」に注目し、姿勢を保持しようとするポテンシャルエネルギーの大きさ、逆に言えば完全に転倒するまでに供給しなければならないエネルギーの大きさによって安定性を評価しようとする考え方が浮上する。このような立場の評価基準として提案されたものが5) の「エネルギー安定余裕 (Energy Stability Margin)」である。この「エネルギー安定余裕」を基に転倒する過程で支持脚周りに重心がどれだけ持ち上げられるかを評価する。

例えば、「安定余裕」を最大化するFig. 2 (2) の姿勢では、傾斜面上側より下側へ転倒するとき重心の浮き上がり量が少ない。そのため歩行機械は下側に転倒しやすい。逆に、傾斜度安定余裕を最大化するFig. 2 (3) の姿勢では、上側へのポテンシャルの障壁 (potential barrier) が小さく、そちら側に転倒しやすい。これらに対し、Fig. 2 (4) は斜面上下の「エネルギー安定余裕」を等しくする姿勢であり、すべての方向の「エネルギー安定余裕」を最大化する姿勢となっている。

2.2 比較実験

このように、不整地での歩行機械の安定性の評価基準にはいくつかのものが考えられているが、実際にはどの評価基準が妥当なのであろうか。「安定余裕」や「傾斜度安定余裕」よりも「エネルギー安定余裕」が望ましいのは明らかと思われる。しかし実際の現象としては、歩行機械が外乱力を受けたとき、脚が一瞬でも浮くとそれをきっかけとして歩行機械が振動を始め、それが原因で転倒することも予測される。そしてもしもこのように考えると、「エネルギー安定余裕」と「傾斜度安定余裕」を組み合わせた、それらの中間的な評価基準が必要であることも推定される。そのため、本研究では以下に示すような簡

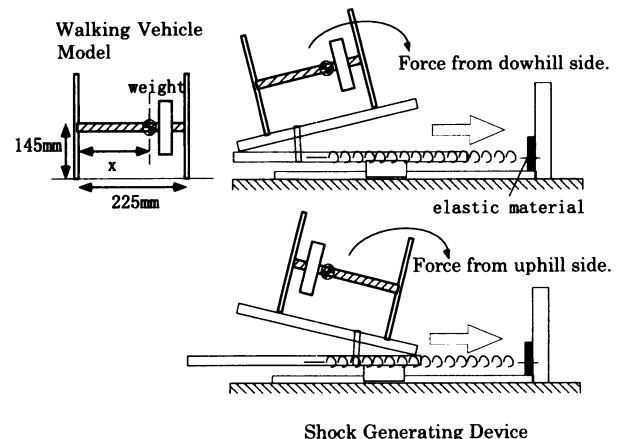


Fig. 3 The experimental device

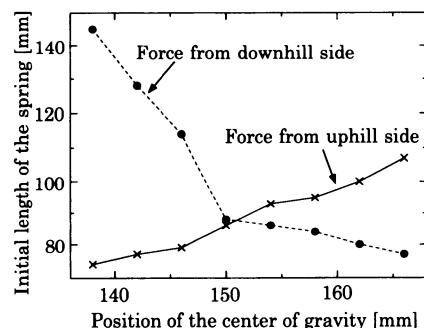


Fig. 4 The experimental results showing the conditions to start tumbling

単な転倒実験による安定性評価の妥当性を検討した。実験装置は、Fig. 3 に示すような質量 1.88 [kg]、前後の脚の間の幅 225.0 [mm]、そして支持面から 145 [mm] 位置にウエイトをスライドして重心位置を変えられる歩行機械モデルを、最大傾斜度 $\theta = 13.6^\circ$ の可動式傾斜面に載せたものである。可動式傾斜面は水平な支持面に対してスライドできるようになっており、一端から常にバネで引っ張り支持面他端のストッパーに衝突させることで、その上の歩行機械モデルに外乱力を与えるものとなっている。実験は、歩行機械モデルを可動式傾斜面にのせ、バネの引き延ばし量を次第に増加させながら可動式傾斜面を何度も衝突させ、載っていた歩行機械モデルが倒れたバネの伸展量（外乱の強さに対応）を記録することで行った。なお、この際に脚が一瞬離れてももとに復帰して安定すれば転倒とはみなさないことをとした。Fig. 4 が実験結果である。これは、歩行機械モデルの重心位置（横軸）に対して転倒を始めるバネの引き延ばし量（縦軸）を、傾斜面の上側と下側それぞれから衝突させた場合を分けて記したものである。この実験から、上下両方に對して最も倒れにくい重心位置は $x = 151$ [mm] であることが分かった。なおこの実験装置についての、上述した「安定余裕」、「傾斜度安定余裕」、および「エネルギー安定余裕」のそれぞれを最大化する重心位置、つまり Fig. 2 における $x_\alpha x_\beta x_\gamma$ に相当する重心位置は、それぞれ $x_\alpha = 112.5$ [mm], $x_\beta = 174.0$ [mm],

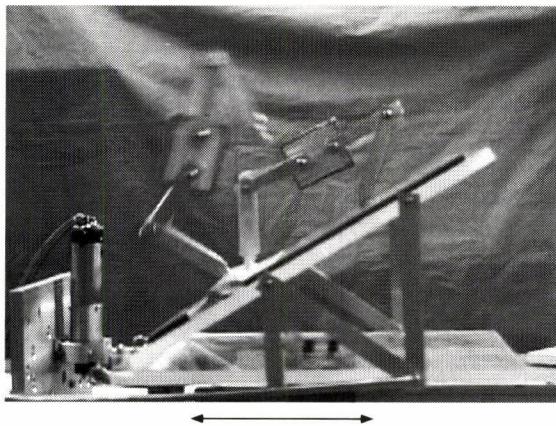


Fig. 5 Another experiment for tumble using walking vehicle models

$x_\gamma = 153.0 [\text{mm}]$ であった。事前の予測では「エネルギー安定余裕」を最大化する姿勢と「傾斜度安定余裕」を最大化する姿勢との間的な姿勢に最適点があると予測したが、この実験結果と計算値の比較からすると安定性の評価基準としては「エネルギー安定余裕」を単体で使用するのが最適であると結論づけられる。

Fig. 5 は同様の実験を歩行機械型のモデルで実施した際の様子であり、この実験からも上述の実験結果と同じ傾向を得ている。

2.3 正規化エネルギー安定余裕の提案

以上の考察から、「エネルギー安定余裕」が不整地での歩行機械の安定性評価基準として望ましいことが明らかとなった。そのため、筆者らは以降「エネルギー安定余裕」を基本的に使用していくことにする。ただし、Klein らによって提案されたこの「エネルギー安定余裕」は、物理的には十分妥当な評価基準であるが、これを歩行機械の安定性の評価基準として使用していくためには不都合な点が残されている。それは、姿勢を保持するボテンシャルエネルギーを評価基準そのものとして使用しているため、歩行機械の重量がその評価の中に残されている点である。

「エネルギー安定余裕」の概念では、歩行機械の自重が増大するとその立位姿勢が変わらなくても安定余裕は比例的に増大することになる。このことは、確かに自重に比例して姿勢保持のためのボテンシャルエネルギーもしくは慣性が増大するという意味では合理的であるが、それと同時に歩行機械の重心に生じる動的外乱の大きさも増大するため、自重を増すことは必ずしも安定性を増加したことにはならない。例えば、歩行機械が凹凸を踏み外したり急停止をしたときに生じる外乱の場合の安定性は自重とは無関係になる。このような状況を考慮すると、不整地における静的安定性評価法としては、あいまい性のある概念の自重をその評価の中には含めず、歩行機械の重心が転倒中に描く軌道の最高点と初期位置との鉛直距離の差で表すような長さの次元を用いる方がより望ましいと思われる。よって、本研究では「エネルギー安定余裕」を自重で正規化した「正規化エネルギー安定余裕 (Normalized Energy Stability Margin)」

を新たに導入する。なお、以後これは省略して「NE 安定余裕」と示し、次式で表記することにする。

$$S_{NE} = h_{\max} - h_0 \quad (1)$$

「NE 安定余裕」は実質的には従来からの「エネルギー安定余裕」とほとんど変わらないものであるが、i) 上述したような外乱が生じた際には、歩行機械の安定性を正当に評価できる、ii) 表記の上で単位が [J] ではなく長さの次元 [mm] となるため、歩容誘導時の幾何学的アプローチの際に便利である、iii) 水平面に置かれた歩行機械の「安定余裕」に対比させて考えると、この評価基準は歩行機械の重心が歩行面に接しているときの「安定余裕」と一致し、従来の概念との連続性があり直感的に理解しやすい、などの利点を有する。

なお「NE 安定余裕」は、さらに歩行機械の基準寸法で正規化すれば完全な無次元化評価基準になる。しかし、筆者らは重心の高さが安定性に及ぼす効果を考慮し、ここではあえて長さの次元の評価基準としている。

3. S_{NE} 等高線とその特性

本論文では、新たに歩行機械の安定性評価基準として NE 安定余裕 S_{NE} を導入した。筆者らは今後、この評価基準 S_{NE} を用いて不整地で安定性を確保した歩容計画を検討する予定である。さて、このような評価基準を用いて任意の凹凸面上での対地適応的な歩容を考察する過程において、まず始めに任意の地形上の任意の地点に歩行機械の重心が置かれたとき、目標の NE 安定余裕 S_{NE} 以上の安定性をすべてのヨー角方向に生成する姿勢を生成する手法、いわば安定立位姿勢の生成手法の誘導が不可欠となる。従来の安定性に関する研究では、任意の姿勢での安定性を求めるることは普通に論じられていたが、逆に安定性の条件からその安定性評価量を最大化する姿勢を誘導する議論はあまり行われていなかった。「安定余裕 S 」についてかつて、歩行面に下ろした重心点の周りに安定余裕 S の半径の円を求め、その円に外接する支持脚多角形を作る歩容計画が概念的に議論されたのが唯一の前例と思われる。本章では、不整地における歩容計画を実行するため、一定の「NE 安定余裕 S_{NE} 」を与える点の集合を結んだ「 S_{NE} 等高線」の概念を導入し、その特性を論じておくことにする。

3.1 誘導の準備

「 S_{NE} 等高線」を誘導するために本論文で設定した最大の仮定は、歩行機械のすべての足先が不整地上においても任意の平面（以降これを「接地面」と呼ぶ）に乗っていると想定している点である。歩行機械が 4 脚以上で支持される場合、すべての足先が同一平面上に存在することはまれで、この仮定は正しくない。しかし、等高線を描くためにはそれを描く平面の設定が不可欠であるため、ここではあえて「接地面」を想定している。なお、4 足歩行機械が 4 脚で立っているときの近似的な「接地面」の誘導法の一例としては、4 脚の足先位置から最小二乗法による誘導などが考えられる。ただしこの誘導法は、歩容生成手法と密接に関連しているため別報で論ずることとし、ここではその詳細には立ち入らない。

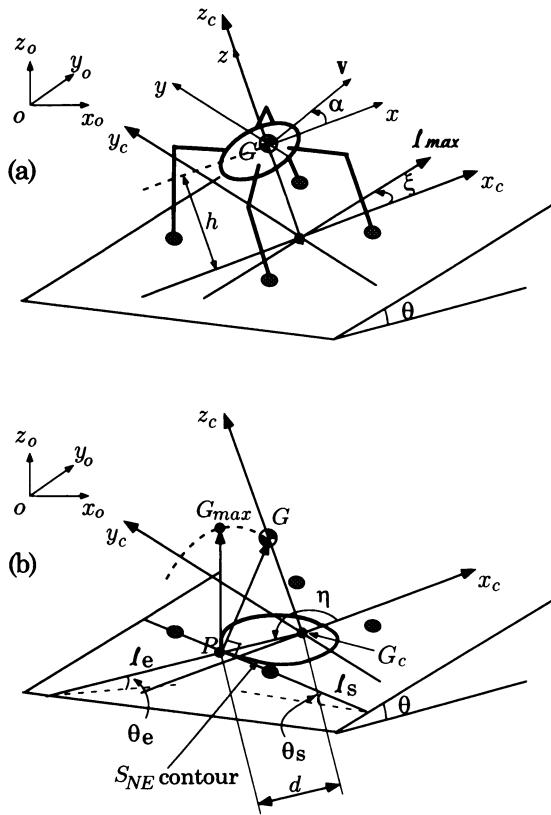


Fig. 6 3D posture of the walking vehicle on a slope
 (a): The body and contact surface coordinates
 (b): The introduction of the S_{NE} contour

これ以外に「 S_{NE} 等高線」の誘導に当たって導入した仮定と用語を以下に示す (Fig. 6 参照).

1) 歩行機械の重心 G は、接地面の点 G_c から垂直距離 h だけ上方にあるものとする。

2) 歩行機械は接地面に対して任意の姿勢をなすものとし、その胴体座標系としては重心 G を原点とし、胴体前方を x 軸、それと直交するように胴体平面上に y 軸、それらと右手座標系をなすように胴体上方に z 軸をとった $\Sigma(Gxyz)$ とする。

3) 接地面上には、点 G_c を原点とする接地面座標系 Σ_c ($G_cx_cy_cz_c$) を想定する。これは直線 G_cG を z_c 軸とし、 x 軸を z_c 軸方向から接地面に投影してできる軸を x_c 軸とし、 x_c 軸に直交する接地面上の軸を y_c 軸とする直交座標系である。誘導する S_{NE} 等高線は、この接地面座標系の x_c-y_c 平面上に描くものとする。

4) 絶対座標系 $\Sigma_0(0x_0y_0z_0)$ は、その z_0 軸が重力線方向を向くものと定義する。

5) 接地面の最大傾斜線 l_{max} は、水平面に対し角度 θ をなすものとする。この角度を以降「最大傾斜角」と呼ぶ。

6) 接地面上で、接地面座標系の x_c 軸と最大傾斜線とのなす角度を「最大傾斜線方位角 ξ 」と呼ぶ。

7) 接地面上の支持脚のうち、お互いに隣り合う 2 脚を結んだ直線を「支持脚直線 l_s 」と呼ぶ。

8) 歩行機械の重心 G から支持脚直線 l_s に下ろした垂線の

足を「転倒中心点 P 」と呼ぶ。

9) 点 G_c から P への半直線を「放射軸線 l_e 」、接地面座標系の x_c 軸と放射軸線とのなす角度を「放射軸線方位角 η 」と呼ぶ。

3.2 S_{NE} 等高線の誘導

歩行機械が転倒する場合、その転倒の過程における歩行機械の重心は、Fig. 6 (b) のように一つの支持脚直線 l_s 回りに回転して転倒すると考えられる。そのため、このような転倒過程での NE 安定余裕 S_{NE} はその支持脚直線 l_s 上に存在する転倒中心点 P の回りに重心が回転したときの重心の初期位置 G から最高点 G_{max} までの鉛直方向の高さの差で求めることができる。そして、 S_{NE} 等高線は、NE 安定余裕 S_{NE} を等しくするすべての転倒中心点 P の集合として接地面内に描かれる閉曲線として定義できる。

Fig. 6 (a) のように傾斜面に立つ歩行機械についての「 S_{NE} 等高線」を誘導しよう。 P からみた重心の絶対座標高さ \vec{PG}_{zo} と重心が転倒するときの軌道の最高点の高さ $\vec{PG}_{max\ zo}$ は次式で表される。

$$\vec{PG}_{zo} = h \cos \theta + d \sin \theta_e \quad (2)$$

$$\vec{PG}_{max\ zo} = \sqrt{h^2 + d^2} \cos \theta_s \quad (3)$$

ただし、 θ_s, θ_e はそれぞれ l_s, l_e 軸が水平面とのなす角度を示し次式のように与えられる。

$$\sin \theta_e = -\cos(\eta - \xi) \sin \theta \quad (4)$$

$$\cos \theta_s = \sqrt{1 - \sin^2(\eta - \xi) \sin^2 \theta} \quad (5)$$

このとき NE 安定余裕 S_{NE} は、これらの式を

$$S_{NE} = \vec{PG}_{max\ zo} - \vec{PG}_{zo} \quad (6)$$

に代入することで求まり、 S_{NE} 等高線は上式の関係を満たす転倒中心点 P を接地面座標系 Σ_c ($G_cx_cy_cz_c$) 上で求めた $(d \cos \eta, d \sin \eta, 0)$ の点の集合として求まる。よって S_{NE} 等高線の描画方法は、NE 安定余裕 S_{NE} 、最大傾斜角 θ 、最大傾斜線方位角 ξ が与えられたとき、放射軸線方位角 η を $0 \leq \eta < 2\pi$ の範囲で変化させ、それぞれの放射軸線方位角 η 方向に対応する G_c から P までの距離 d を算出して得られる。なお、 d は S_{NE} 、 θ 、 ξ 、 η の関数であり、以下のように誘導できる。

$$d = \frac{-B \pm \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A} \quad (7)$$

ただしここで、 $A = \sin^2 \theta_e - \cos^2 \theta_s$, $B = (S_{NE} + h \cos \theta) \sin \theta_e$, $C = (S_{NE} + h \cos \theta)^2 - h^2 \cos^2 \theta_s$ である。この式で誘導できる d の解は二つあるが $d < 0$ である解は使用しない。2 解とも $d > 0$ である場合は、同一放射軸線方位角 η に対して実際に二つの解が存在することを意味している。

S_{NE} 等高線の実際の誘導例を Fig. 7 に示す。ここで (a) は最大傾斜角 $\theta = 0^\circ$ 、つまり水平面での S_{NE} 等高線であり、(b) は $\theta = 15^\circ$ の例である。なお、ここでは重心と斜面との距離 h は 380 [mm] とし、最大傾斜線と x_c 軸は一致し $\xi = 0^\circ$ であると考えている。等高線のわきに付した数字は NE 安定余裕の値

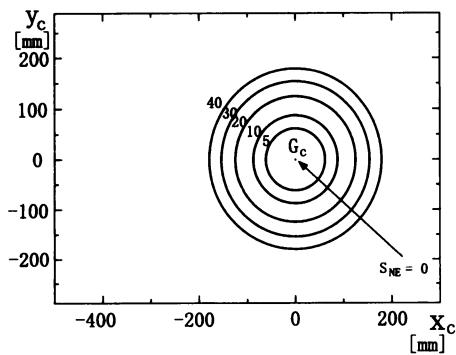
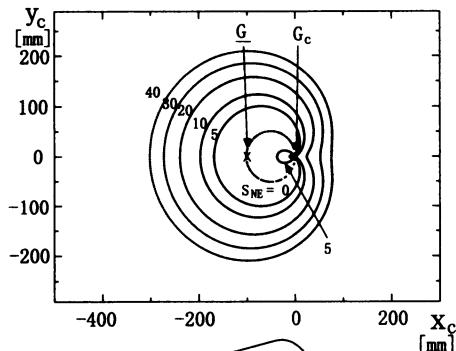
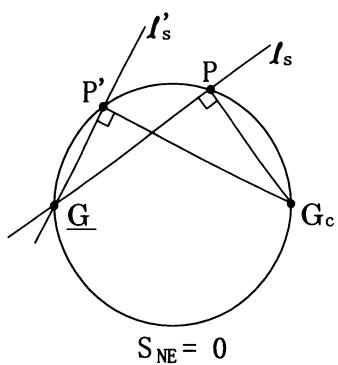
(a) S_{NE} contour in the case of 0 degrees(b) S_{NE} contour in the case of 15 degrees(c) The extended figure of $S_{NE} = 0$ in Fig. 5(b)

Fig. 7

[mm]である。Fig. 7(a) から $\theta = 0^\circ$ における S_{NE} 等高線は、「安定余裕」の考え方と等しく、 $S_{NE} = 0$ の点を中心とした同心円状となること、また Fig. 7(b) から $\theta = 15^\circ$ では S_{NE} 等高線は斜面下側方向に膨らんだ特異な形状になることが分かつた。

なおこの等高線は、すでに述べたように斜面をなす接地面上に描かれたものである。

3.3 S_{NE} 等高線の性質

Fig. 7 (b) の S_{NE} 等高線には二つの特異点が存在している。それらは重心 G から接地面へ下ろした垂線の足 G_c と、重心からの重力線が接地面を横切る点 \underline{G} である。それぞれは以下の特徴を有した点となっている。

(1) G_c 点は、この周りに S_{NE} 等高線を描く中心点である。そのため G_c 点上では特異的に支持脚直線の向きは全方向を向くことが可能である。これらのうち、支持脚直線が最大傾斜線と直交する向きへの NE 安定余裕が最大であり（その最高値を $S_{NE}(G_c \max)$ とする）、支持脚直線の方向を傾けるに従い NE 安定余裕は徐々に減少し、最大傾斜線と一致した時点で $S_{NE} = 0$ となる。

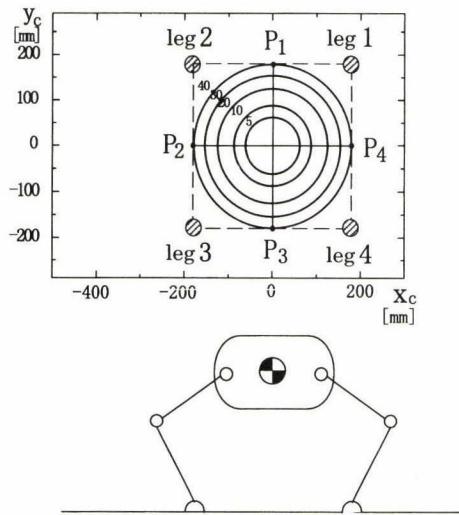
(2) \underline{G} 点は、その真上に重心が存在する点である。そのため、 \underline{G} 点周りの回転で重心を回転させる場合、その回転による重心の位置は、その回転軸の方向にかかわらず始めの重心の位置より上にいくことがない。つまり、支持脚直線が \underline{G} 点を通過するのであれば、その支持脚直線の方向にかかわらず常に $S_{NE} = 0$ が成り立つ。

上記二つの特異点があることから傾斜面における S_{NE} 等高線は次の性質を有することになる。

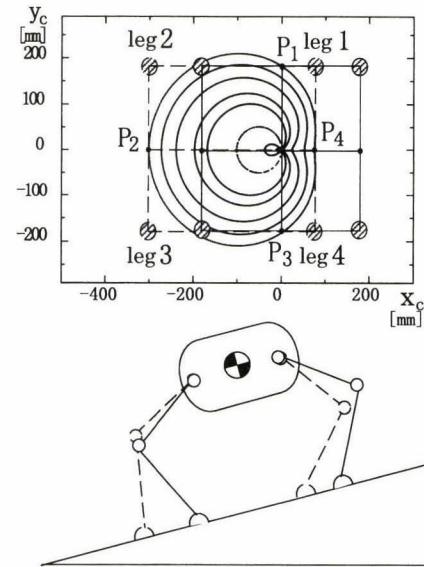
i) S_{NE} 等高線における $S_{NE} = 0$ の点は、水平面では \underline{G} が G_c と重なり G_c の 1 点のみであるが、傾斜面における $S_{NE} = 0$ の点は実は 1 点とはならず、 \underline{G} 点と G_c 点とを結ぶ線分を直径とする円になるという興味深い特徴を示す。この理由は Fig. 7(c) を用いて次のように説明できる。放射軸線 $G_c P$ は P 点で直交する支持脚直線 l_s を有するが、もしもこの l_s が \underline{G} 点を通過すればその上の P 点では $S_{NE} = 0$ となる。このような P 点は $\angle GPG_c = 90^\circ$ を成す点の集合となる。一方、円の直径を弦とする円周角は 90° を成す幾何学的性質がある。よってこのような P 点の集合は $\underline{G}G_c$ を直径とする円と理解できる。

ii) \underline{G} 点と G_c 点とを結ぶ線分を直径とする円の内部は $0 < S_{NE} < S_{NE}(G_c \max)$ の S_{NE} 等高線が描かれ、円の外部には $S_{NE} > 0$ の S_{NE} 等高線が無限に描かれる。 $S_{NE} = 0$ の内部と外部に同じ高さの等高線が生じることは立体的な回転軌跡の特性からもたらされるものであり、式(7)の 2 次方程式で表される解が二つ存在することに対応したものとなっている。Fig. 7 (b) の図においては $S_{NE}(G_c \max) \approx 10$ となり、その値以下を有する S_{NE} 等高線の一つとして $S_{NE} = 5$ が $S_{NE} = 0$ の円の内外両方に存在している。

なお、導入した「 S_{NE} 等高線」の安定化姿勢への利用法を最後に示しておくことにする。 $\theta = 0^\circ$ において $S_{NE} = 40$ を有するように 4 脚 leq1～leq4 を Fig. 8 (a) のような脚配置に設定することを計画しようとするとき、 $\theta = 15^\circ$ においてこれとまったく同じ姿勢を保持して立脚しようとすると、Fig. 8 (b) の実線姿勢のように斜面下側の NE 安定余裕が 10 以下になり、上側へは 40 を大幅に越えた値となる。(a) と同じように $\theta = 15^\circ$ においても 4 方向に 40 の NE 安定余裕を有するようになるには、「 S_{NE} 等高線」に接する条件から (b) の点線に示すような姿勢であることが分かる。



(a) The robot takes the posture which possesses $S_{NE} = 40$ for all directions on 0 degree slope



(b) The feet on 15 degrees should be shifted just like dotted line so as to keep the same S_{NE} as (a).

Fig. 8

4. 結 論

本論文においては、不整地における歩行機械の静的安定性評価基準について総合的な比較検討を行い、簡易実験の結果に基づいて転倒に至りにくい姿勢としては、Klein らによって提案された「エネルギー安定余裕」を最大にするものであることを確認した。しかし、一般の歩行機械の安定性の評価基準としてはエネルギーの次元をそのまま用いることは不適切であることを指摘し、新たに「正規化エネルギー安定余裕（あるいは NE 安定余裕） S_{NE} 」を提案した。さらに、NE 安定余裕を歩容計画に利用するために必要な「 S_{NE} 等高線」の作成方法を示し、その特徴を論じた。今後はこのような考え方を発展させ、任意の不整地での安定歩容計画法を検討していく予定である。

参考文献

- [1] S. Hirose, K. Yoneda and H. Tsukagoshi: "TITAN VII:

Quadruped Walking and Manipulating Robot on a Steep Slope," IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.494–500, 1997.

- [2] R.B. McGhee, and A.A. Frank: "On the Stability Properties of Quadruped Creeping Gaits," Math. Biosciences, vol.3, pp.331–351, 1968.
- [3] 米田, 広瀬: "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.
- [4] 広瀬, 岩崎, 梅谷: "歩行機械の静的安定性評価基準", 第 21 回自動計測制御連合講演会, pp.253–254, 1978.
- [5] E.G. Papadopoulos and D.A. Rey: "A New Measure of Tipover Stability Margin for Mobile Manipulators, IEEE International Conference on Robotics and Automation," pp.3111–3116, 1996.
- [6] DOMINIC A. MESSURI and CHARLES A. KLEIN: "Automatic Body Regulation for Maintaining Stability of a Legged Vehicle During Rough-Terrain Locomotion," IEEE JOURNAL OF ROBOTICS AND AUTOMATION, vol.RA-1, No.3, SEPTEMBER, 1985.
- [7] A. Ghasempoor and N. Sepehri: "A Measure of Machine Stability for Moving Base Manipulators," IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.2249–2254, 1995.



広瀬茂男 (Shigeo Hirose)

1947 年 12 月 6 日生。1976 年東京工業大学制御工学科専攻博士課程修了。同年、同学機械物理工学科助手、1979 年同学助教授、1992 年同学教授、現在に至る。ロボットの機構、センサ、制御の研究に従事。工学博士。 (日本ロボット学会正会員)



塚越秀行 (Hideyuki Tsukagoshi)

1969 年 7 月 10 日生。1992 年東京工業大学制御工学科卒業。1994 年同大学院修士課程制御工学専攻修了。1998 年同大学院博士課程機械物理工学専攻修了。同年、日本学術振興会特別研究員 PD (COE), 現在に至る。移動ロボットの研究に従事。博士 (工学)。 (日本ロボット学会正会員)



米田 完 (Kan Yoneda)

1961 年 10 月 16 日生。1985 年東京工業大学理学部物理学科卒業。1987 年同大学院修士課程物理學専攻修了。1989 年同大学院博士後期課程機械物理工学専攻中退。同年同学機械物理工学科助手、1994 年同学同助教授、現在に至る。歩行ロボットの研究に従事。博士 (工学)。 (日本ロボット学会正会員)