

四脚ロボットの斜面歩行における 転倒安定余裕に基づく歩容解析

Gait Analysis of a Four Legged Robot on Sloped Terrain Based on Tumble Stability Margin

○白井有樹*, 蓑手勇人*, 永岡健司*, 吉田和哉*

○ Yuki Shirai*, Hayato Minote*, Kenji Nagaoka*, Kazuya Yoshida*

* 東北大学

*Tohoku University

キーワード： 脚ロボット (Legged Robot), 転倒安定余裕 (Tumble Stability Margin), 可操作度 (Manipulability), 歩容解析 (Gait Analysis), 静歩行 (Static Walking)

連絡先： 〒 980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-01 東北大学 工学部 機械知能・航空工学科 吉田研究室
白井有樹, Tel.: 022-795-6993, Fax.: 022-795-6993, E-mail: shirai@astro.mech.tohoku.ac.jp

1. 緒言

現在, 将来の月面基地候補として, 月の縦穴を探查することが求められている¹⁾. しかし, 月の縦穴のような, 急峻な崖環境を探查することは, 従来の車輪型ロボットでは非常に困難である. したがって, このような環境を踏破可能なロボットが探查を行う上で必要となる. 筆者らは, 昆虫規範型グリッパを有するフリークライミングロボットの研究開発を行ってきた (Fig. 1)²⁾. 本ロボットは, 周囲の環境をグリッパでしがみつきながら移動することで, 崖地や傾斜面を踏破することが可能である. このようなロボットを実現する上で, 歩容制御が必要となる.

今日まで多くの歩容が提案されてきた^{3), 4)}. 多くは ZMP (Zero Moment Point)⁵⁾ を用いてロボットの動的安定性を評価している. しかしながら, ZMP による安定性評価は, 斜面や崖の

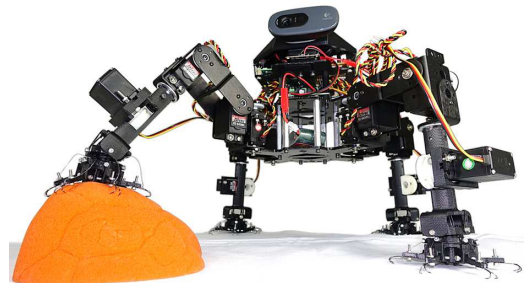


Fig. 1 Quadruped free-climbing robot with grippers

ような不整地へそのまま適用することはできない. また, フリークライミングロボットの安定性を正確に評価するためには, グリッパの把持力も考慮した安定性評価指標が必要となる. さらに, 脚ロボットが歩行するとき, 意図した運動を実現できるかは, 脚の可操作度に依存する. したがって, 可操作度も考慮した歩容を構築する必要がある.

そこで本研究では, 傾斜面を歩行する四脚ロ

ロボットの歩容を，転倒安定余裕および可操作度の観点から評価し，より急峻な斜面を歩行可能な歩容を提案する．

2. 四脚ロボットの歩容解析

2.1 転倒安定余裕

本研究では，静歩行について議論する．将来の月惑星探査の視点から考えると，月面や小惑星表面は未知かつ無人の環境であるため，移動探査ロボットに求められるのは確実な探査能力である．そこで本研究では，ロボットの静的安定性が常に保たれる静歩行について議論する．ただし，静歩行をするうえでもロボットには慣性力が作用するため，本研究では静歩行時のロボットの動的な安定性を評価する．また，四脚ロボットは静歩行を実行可能な最小脚本数である．月惑星探査を行ううえでロケットのペイロードは可能な限り軽いほうがコストの観点から良い．ゆえに，四脚ロボットを対象とした静歩行を考える．

ロボットの動的安定性を評価する指標としてはZMPを用いた手法が知られている⁵⁾．これは，ロボットのZMPの水平面への射影点から，脚先端を水平面へ投影してできる支持多角形の各辺までの最小距離で規定される．しかしこの手法は，平地における歩行を対象とした指標であり，不整地ではそのまま適用できない．さらに，Fig. 1に示すフリークライミングロボットの安定性を議論する際，グリッパの把持能力を考慮した指標が必要である．したがって本研究では，不整地で利用可能かつグリッパの把持能力を考慮した動的安定性評価指標として，転倒安定余裕を採用する．転倒安定余裕は，歩行ロボットが転倒する際に，必ず2点支持の状態を経ることに着目し，その2つの支持点が成す転倒軸周りのモーメントを評価することで，不規則な凹凸や傾斜の存在する不整地での安定性を定量的に評価する指標である⁶⁾．

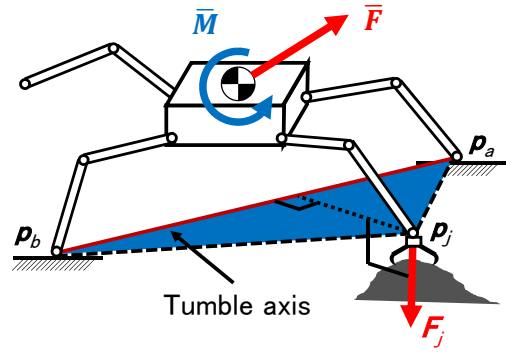


Fig. 2 Dynamics model of a quadruped robot

ここで転倒安定余裕を求める．まず，歩行ロボット各脚の運動を計画したとき，その各脚の加減速に必要な力とモーメントの合計 \mathbf{F}_a , \mathbf{M}_a を算出する．歩行ロボットを質量 m_i ，位置ベクトル \mathbf{q}_i の L 個のリンクの質量集中系とすれば，

$$\mathbf{F}_a = \sum_{i=1}^L m_i \ddot{\mathbf{q}}_i \quad (1)$$

$$\mathbf{M}_a = \sum_{i=1}^L m_i \mathbf{q}_i \times \ddot{\mathbf{q}}_i \quad (2)$$

となる．一方，歩行ロボットに対して作用する力は，重力，接地面からの反力，接地点以外の各リンクに直接働く外力である．ここでは，各リンクに働く重力を合計した力とモーメントを \mathbf{F}_G , \mathbf{M}_G ，接地点以外の各リンクに直接働く外力を合計した力とモーメントを \mathbf{F}_0 , \mathbf{M}_0 とする (Fig. 2)．力のつり合いの関係より，接地面から得るべき力 $\bar{\mathbf{F}}$ とモーメント $\bar{\mathbf{M}}$ は，

$$\bar{\mathbf{F}} = \mathbf{F}_a - \mathbf{F}_G - \mathbf{F}_0 \quad (3)$$

$$\bar{\mathbf{M}} = \mathbf{M}_a - \mathbf{M}_G - \mathbf{M}_0 \quad (4)$$

と表せる．ロボットの脚の各接地点を P_a , P_b , \dots , P_n ，その位置ベクトルを \mathbf{p}_1 , \mathbf{p}_2 , \dots , \mathbf{p}_n とする．このうち，任意の2つの接地点 P_a , P_b を結ぶ線分周りのモーメント M_{ab} は， $\bar{\mathbf{F}}$ と $\bar{\mathbf{M}}$ より求められる．

まず， $\bar{\mathbf{F}}$ について考える． $\bar{\mathbf{F}}$ は座標系の原点に働く並進力である．この並進力によって与え

られる接地点 P_b 周りのモーメント $M_{b\bar{F}}$ は,

$$M_{b\bar{F}} = \bar{F} \times p_b \quad (5)$$

である。このモーメントの接地点 P_a, P_b を結ぶ線分周りのモーメントの大きさは,

$$M_{ab\bar{F}} = M_{b\bar{F}} \cdot \frac{(p_a - p_b)}{|p_a - p_b|} \quad (6)$$

となる。

次に、 \bar{M} について考える。 \bar{M} は座標系の原点周りのモーメントである。このモーメントの接地点 P_a, P_b を結ぶ線分周りのモーメントの大きさは,

$$M_{ab\bar{M}} = \bar{M} \cdot \frac{(p_a - p_b)}{|p_a - p_b|} \quad (7)$$

である。以上の式 (6), (7) を加算し整理すると、接地点 P_a, P_b を結ぶ線分周りのモーメントは,

$$M_{ab} = \bar{M} \cdot \frac{(p_a - p_b)}{|p_a - p_b|} + \bar{F} \cdot \frac{(p_b \times p_a)}{|p_a - p_b|} \quad (8)$$

である。以降、このモーメント M_{ab} を転倒モーメントと呼ぶ。ここでは、接地点 P_a, P_b は浮き上がらないと仮定する。2点のみの接地の場合には、式 (8) がゼロであることが転倒しない条件である。そうでないときは、線分 $P_a P_b$ 周りに回転して倒れこみを生じる。3点以上の接地では、線分 $P_a P_b$ 周りのモーメントがゼロでない場合も倒れこみが生じる向きが、いずれかの接地点を接地面に押し付ける方向であれば実際にはその点で支えられ転倒しない。

ここで、グリップの把持力を転倒安定性に導入する。グリップの保持力は、歩行ロボットの接地点を接地面に押し付ける力と考えることができ、接地点 j を保持しているグリップの保持力を F_j とすると、グリップの保持力が転倒軸周りに及ぼすモーメントは,

$$M_{jab} = F_j \cdot \frac{(p_b - p_j) \times (p_a - p_j)}{|p_a - p_b|} \quad (9)$$

である。このモーメントを転倒モーメントに考慮することで、把持性能を考慮したロボット全

体の転倒モーメントは,

$$M_{ab} = \bar{M} \cdot \frac{(p_a - p_b)}{|p_a - p_b|} + \bar{F} \cdot \frac{(p_b \times p_a)}{|p_a - p_b|} - M_{jab} \quad (10)$$

と表すことができる。式 (10) の転倒モーメントを評価することで把持性能を考慮した転倒安定性を判別することができる。

ここで n を脚の本数とし、転倒モーメント M_{ab} を $a = 1 \sim n, b = 1 \sim n (a \neq b)$ のすべての転倒軸の組み合わせについて求める。求めたすべての転倒モーメントが残りの支持脚によって打ち消されるとき、その絶対値の中から最小値を算出する。この算出された $\min |M_{ab}|$ を生じる転倒軸まわりにロボットは最も転倒しやすい。この値をロボットの重量で割った値を転倒安定余裕 T_{SM} と呼ぶ。すなわち,

$$T_{SM} = \frac{\min |M_{ab}|}{mg} \quad (11)$$

と記述される。ただし、転倒安定性が満たされない場合、転倒安定余裕は0とする。 $\min |M_{ab}|$ をロボットの重量で割ることで、転倒安定余裕の単位が長さの次元となるため、歩容誘導時の幾何学的アプローチが容易となる。さらに、水平面での歩行の場合には、この評価指標は従来のZMPを用いた安定評価と同じ値を示し、従来の概念と連続性がある。

この転倒安定余裕を用いれば、平面以外の一般の地形における歩行について、計画した運動の転倒安定性を定量的に評価できる。

2.2 可操作度

脚ロボットの傾斜面における歩行を評価する上で、転倒安定余裕に加え可操作度も評価する必要がある。可操作度は脚の操作性を表すパラメータである。また、脚ロボットは胴体にマニピュレータが接続しているものとして考えることができる。マニピュレータは特異点において一つ以上の関節自由度が縮退し、一度特異点にマニピュレータが陥ってしまえば、マニピュレー

タをそれ以上操作することができなくなる。これは、斜面をロボットが登攀するとき特に重要な問題となる。斜面を脚ロボットが歩行する時、転倒安定余裕が高い歩行が安定性の観点からは望ましいため、それを実行するために場合によっては脚が特異点に陥ってしまい、その状態からロボットが移動できなくなることが想定される。よって、転倒安定余裕のみではなく、脚の可動性を評価する指標として、本研究では可操作度を採用する。

ここで、可操作度を求める。いま n 自由度の脚を考え、脚の姿勢を表す関節ベクトル $\theta = [\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n]^T$ とする。すると可操作度 w はヤコビアン $J(\theta)$ を用いて次式で表現される⁷⁾。

$$w = \sqrt{\det(J(\theta)J^T(\theta))} \quad (12)$$

本研究では、Fig. 1 に示したロボットを対象として歩容解析を行ったが、その一脚における関節の配置を Fig. 3 に示す。Fig. 3 において、 $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ はそれぞれ関節 1, 2, 3 の関節角度を表し、 L_1, L_2, L_3 はそれぞれリンク 1, 2, 3 の長さを表す。これらを用いて対象としているロボットの可操作度 w は式 (12) を使って、

$$w = L_2 L_3 |(L_1 + L_2 C_2 + L_3 C_{23}) S_3| \quad (13)$$

と表せる。ただし、 $C_n = \cos \theta_n$, $S_Y = \sin \theta_n$, $C_{nm} = \cos(\theta_n + \theta_m)$ とする。

2.3 歩容の定義

歩容を解析するために必要な各パラメータを Table 1 に示す。以下、本研究で解析する各歩容を歩容図を用いて説明する。なお歩容図とは、ロボットの胴体中心に対する各脚先端の位置を時系列に示した図である。

2.3.1 基準歩容

水平面を x 方向へ歩行しているロボットを考える。Fig. 4 に基準歩容の歩容図を示す。Fig. 4

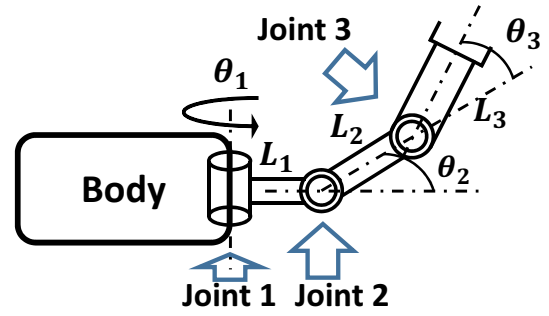


Fig. 3 Kinematic definition

Table 1 Definition of gait parameters

Parameter	Definition
T [s]	Time of a gait cycle
T' [s]	Time of a swing phase
T'' [s]	Time of a stance phase
T''' [s]	Time of a quadruped stance phase
β [-]	Duty factor: Ratio of T'' to T
Δx_0 [m]	Stride
x_0^* [m]	x -directional stroke
y_0^* [m]	y -directional stroke
h [m]	Height of COG to slope
h_0 [m]	Height of COG to horizontal plane
θ [rad]	Slope angle
μ [-]	Coefficient of static friction

中の青長方形は脚の可動領域を表している。ここで基準歩容とは、平面歩行において全ての脚のデューティ比 β が等しく、各脚の基準位置が進行方向に対して左右対称に配置され、左右の脚の位相差が 0.5 の歩容である。基準歩容をロボットが平面で実現するとき、ロボットは常に安定性を保ちながら歩行を実現する。ただし、 $\beta = 0.75$ のクロール歩容において、遊脚の切り替わる瞬間では $T_{SM} = 0$ となる。

2.3.2 傾斜適応歩容

Fig. 5 のような斜面を歩行することを考える。ただし、ロボットは滑らない、つまり、 $\mu > \tan \theta$ とする。Fig. 5 において、重心を斜面に投影した点と重心を斜面に垂直に下した点間の距離 d は、

$$d = h \tan \theta \quad (14)$$

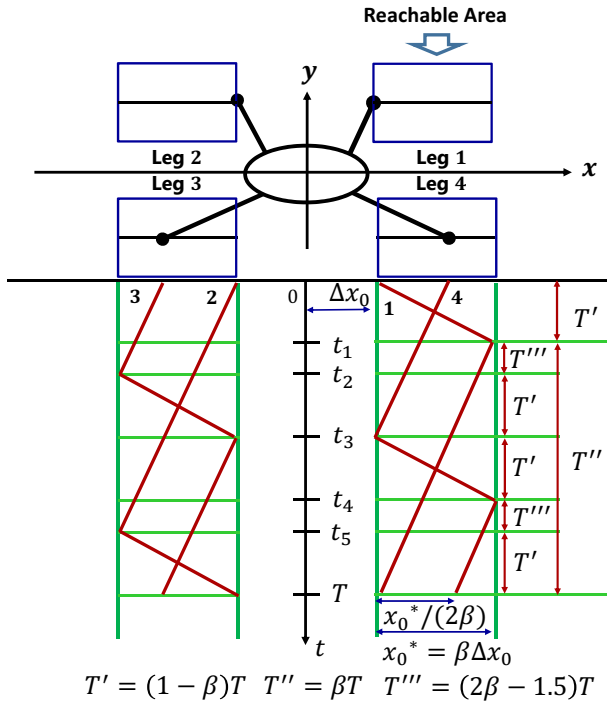


Fig. 4 Relative foot positioning in an x -directional standard gait

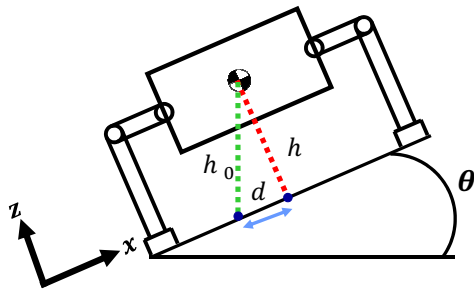


Fig. 5 Robot standing on a slope

で表せる．この状態でロボットを歩行させると、低い位置にある脚により大きな荷重が作用し、その脚が遊脚になるときに転倒安定余裕の低下を招き、ロボットが転倒する可能性がある．傾斜適応歩容はこの d の変位だけ、胴体を斜面の上側へシフトさせることで、転倒安定余裕を維持してロボットの転倒を防ぐ歩容である (Fig. 6)³⁾．

Fig. 7 に胴体を x 方向に Δx 並進した傾斜適応歩容の歩容図を示す．この歩容を実現することで脚ロボットは傾斜面において、安定して歩行できる．しかし、この傾斜適応歩容は常に実行できるとは限らない．なぜならば、確実に脚を可動できる領域は青い長方形であるが、胴体を Δx 並進させたため、その分だけ脚が可動領

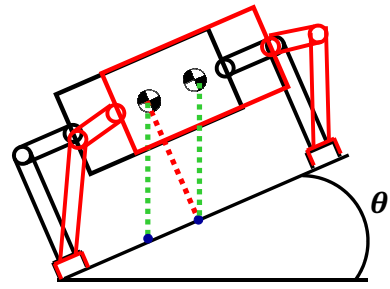


Fig. 6 Adaptation to the position of the COG

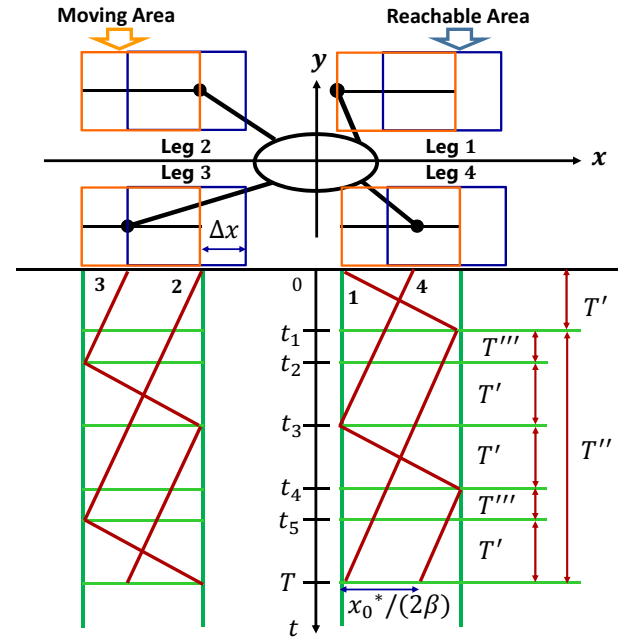


Fig. 7 Relative foot positioning in an x -directional adaptive gait

域からはみ出してしまうためである．この可動領域外で脚を動かすことはできず、可操作度が 0 となる．そこで、本研究ではこの可動領域を考慮した傾斜適応歩容として Fig. 8 に示す歩容を適用する．Fig. 8 では、脚のストロークが小さくなっていることが確認できる．すなわち、可動領域を考慮した傾斜適応歩容は、歩幅を小さくすることで可動領域外へ脚が出ることを防ぎつつ、基準歩容と比べて大きな転倒安定余裕を保つことができる歩容といえる．

2.3.3 左右揺動歩容

先行研究として、左右揺動歩容が提案されている⁸⁾．Fig. 5 に示す斜面歩行を考える．ここ

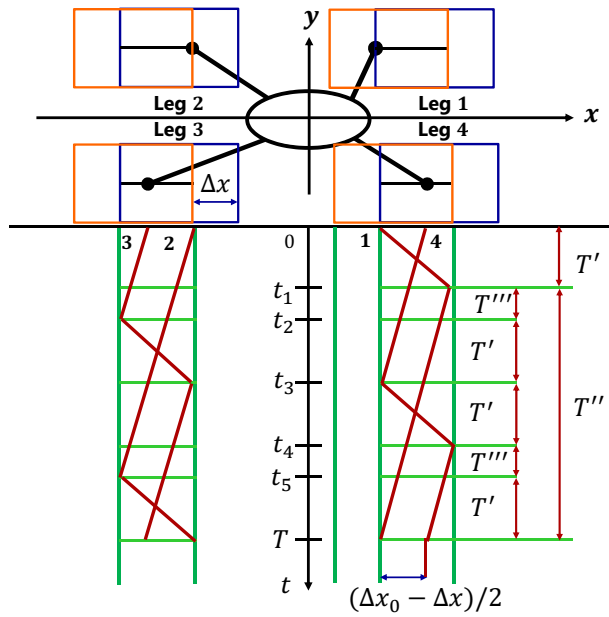


Fig. 8 Relative foot positioning in an x -directional adaptive gait considering manipulability

で、紙面に対して奥行き方向を y 軸とする。左右揺動歩容では、 y 軸方向の胴体の加速度を調節することで、動歩行をするロボットの ZMP 軌道を支持直線上に乗せ、ロボットを安定に歩行させる歩容である。

本研究では、上記の左右揺動歩容と同様に胴体を y 軸方向に胴体を揺動させることで転倒安定余裕の低下を防ぐ歩容を考案する。本研究では、静歩行を対象とした歩容を提案しており、ここで提案した左右揺動歩容は、胴体を準静的に移動することで、ロボットを安定化する転倒モーメントを増加させる。Fig. 9 に左右揺動歩容の歩容図を示す。Fig. 9 では、 x 軸方向の歩容図は Fig. 4 と同じであり、Fig. 9 では y 軸方向の歩容図を示している。左右揺動歩容では、四脚支持期で胴体を予め左右に揺動させ、遊脚期における転倒安定余裕の減少を抑える働きがある。

2.3.4 ハイブリッド歩容

傾斜適応歩容および左右揺動歩容では、ロボットの胴体を斜面に対して移動させることで斜面歩行時のロボットの安定性を保つ歩容であった。

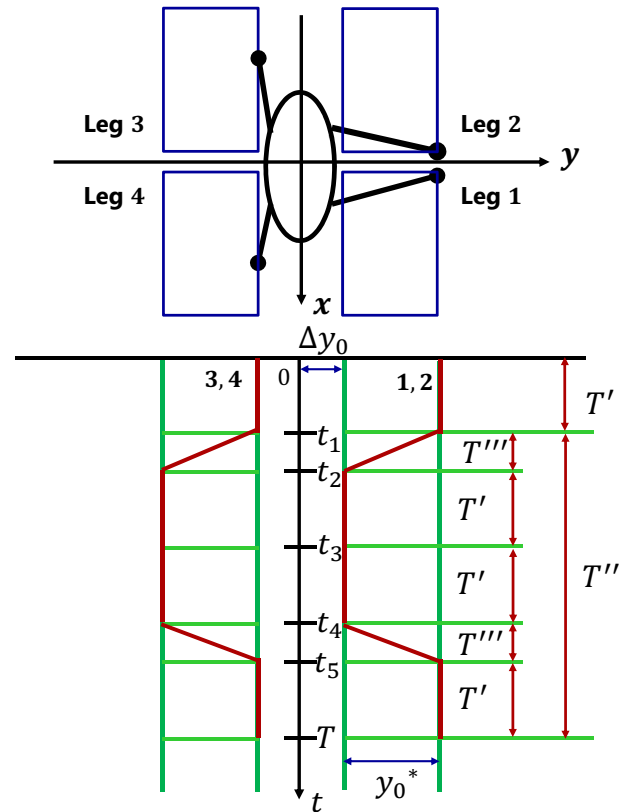


Fig. 9 Relative foot positioning in an x -directional sway compensation gait

しかし、どちらの歩容も可動領域がロボットのハードウェアに依存して決まり、この領域が各歩容の限界を決定する。そのため、脚可動領域を最大限活用でき、より急峻な斜面を踏破可能となる歩容が必要となる。そこで本研究では、この傾斜適応歩容と左右揺動歩容の両方を組み合わせたハイブリッド歩容を提案する。すなわち、斜面に対して胴体を進行方向である x 軸方向へ並進させ、四脚支持期では胴体が左右に揺動する歩容である。これにより、転倒安定余裕が 0 になることを防ぎ、より急峻な斜面歩行を実現する。

3. シミュレーションによる斜面歩行解析

本節では、第 2 節で説明した各歩容の有効性を、シミュレーションで検証する。本研究では、Fig. 1 のロボットを対象とした歩容解析を行っ

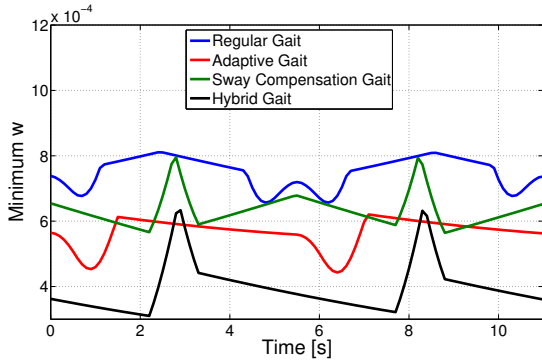


Fig. 10 Time histories of manipulability of gaits

た. Fig. 1 のロボットにおいて, $L_1 = 2.9$ [cm], $L_2 = 5.6$ [cm], $L_3 = 14.1$ [cm] である. さらに, 胴体の質量を m_0 , 脚のリンク 1, 2, 3 の質量をそれぞれ m_1, m_2, m_3 とすると, $m_0 = 676$ [g], $m_1 = 95$ [g], $m_2 = 110$ [g], $m_3 = 9$ [g] となる. また, 各歩容において, $T = 11$ [s], $\beta = 0.8$, $\Delta x_0 = 5.0$ [cm], $h = 11.3$ [cm] と設定した. さらに, 傾斜適応歩容と左右揺動歩容において胴体の揺動変位量はどちらも 4.0 cm とした. ハイブリッド歩容では, 胴体を前方に 4.0 cm, 左右に 4.0 cm 揺動させた.

3.1 歩容と可操作度の関係

Fig. 10 に, 各歩容を一周期実行した時の可操作度の時間変化を示す. ただし Fig. 10 において, 四脚ロボットには脚が胴体に四脚備わっており, それぞれの脚に対して可操作度を計算することが可能となる. そのため, Fig. 10 では四脚の可操作度のなかで最小となる可操作度を示している. Fig. 10 より, 基準歩容の可操作度が最大でハイブリッド歩容の可操作度が小さな値を示していることがわかる. したがって, ハイブリッド歩容では可操作度を犠牲にして安定性を向上させている. しかし, 傾斜適応歩容と左右揺動歩容と比較して, ハイブリッド歩容は脚可動領域をより多く利用できる. これは, ロボットの胴体を揺動可能な変位と相関関係があり, 可動領域が大きいほど揺動可能な変位も増加

する. したがって, ハイブリッド歩容は可操作度の観点からすると一見好ましくない歩容と考えられるが, 揺動可能な変位量が大きいため, より安定した歩行を実現できる可能性が推察される.

3.2 歩容と転倒安定余裕の関係

傾斜 17 度の斜面を, 基準歩容, 傾斜適応歩容, 左右揺動歩容で歩行したときの転倒安定余裕の時間変化をシミュレーションで求めた. その結果を Fig. 11 に示す. 各歩容とも遊脚期では転倒安定余裕は小さな値を, 支持期では大きな値を示していることが確認できる. 特に Fig. 11 において, 脚 3 が遊脚になる時刻 3.2 秒付近で基準歩容の転倒安定余裕の値が 0 であることが確認できる. したがって, このときロボットは不安定となる. 一方, Fig. 11 において, 傾斜適応歩容と左右揺動歩容の転倒安定余裕が 0 になる時刻は存在しなかった. これは, 一周期ロボットが歩行する時に安定して斜面を歩行できることを示している.

続いて, 傾斜 23 度の斜面を, ハイブリッド歩容, 傾斜適応歩容, 左右揺動歩容で歩行したときの転倒安定余裕の時間変化をシミュレーションで求めた. その結果を Fig. 12 に示す. Fig. 12 において, 傾斜適応歩容および左右揺動歩容のどちらも一周期の中で転倒安定余裕が 0 になる時刻が複数回あることが確認でき, 転倒安定余裕が最初に 0 になる時刻は, 脚 3 が遊脚になる時刻 3.2 秒であることが確認できる. 一方, ハイブリッド歩容は一周期の歩容で転倒安定余裕が 0 になる時刻が存在しなかった. したがって, ハイブリッド歩容を選択することでロボットは安定して斜面を歩行可能となる.

4. 実験による斜面歩行解析

本節では, 第 2 節で説明した各歩容の有効性を, 実験を通して検証する. 第 3 節のシミュレーション結果から, 斜面歩行時に転倒安定余裕が

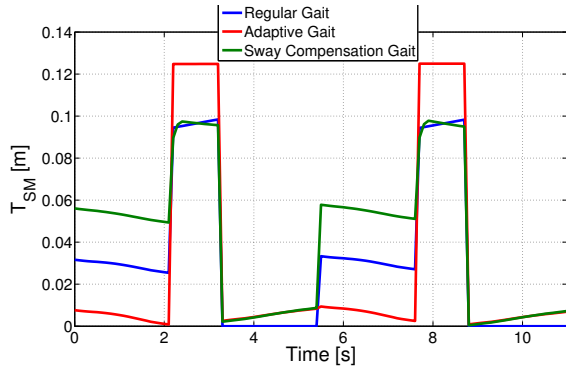


Fig. 11 Time histories of tumble stability margin of gaits on 17 degrees slope

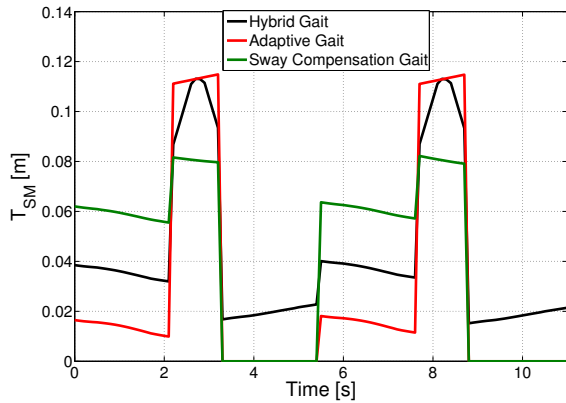


Fig. 12 Time histories of tumble stability margin of gaits on 23 degrees slope

0になるとき、転倒安定余裕の概念から、ロボットは動的に不安定になる。また、ハイブリッド歩容は、転倒安定余裕が0になる時刻が歩容で存在しなかったことから、斜面歩行を行うとき安定性を保ったまま歩行可能な歩容である。本節ではこれらのシミュレーション結果を Fig. 1 のロボットを用いて、実際に各歩容を適用したときのロボットの安定性評価を行う。なお、本実験はモーションキャプチャシステムを用いてロボットの挙動を記録した。

4.1 歩容と転倒安定余裕の関係

Fig. 5 の y 軸を回転軸とした右ねじの向きを負とする角度をピッチ角とする。また、傾斜 17 度の斜面を、基準歩容、傾斜適応歩容、左右揺動歩容で歩行したときのピッチ角速度を実験に

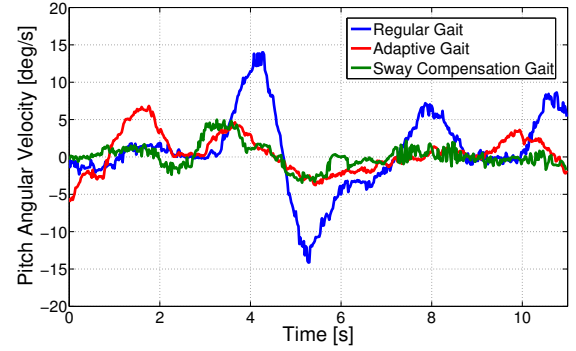


Fig. 13 Time histories of pitch angular velocity of gaits on 17 degrees slope

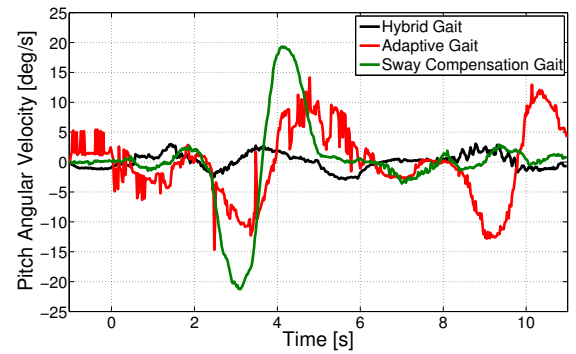


Fig. 14 Time histories of pitch angular velocity of gaits on 23 degrees slope

て記録し、その結果を Fig. 13 に示す。

Fig. 13 において、基準歩容のピッチ角速度が正の向きに大きな値を示しており、脚 3 が遊脚となる時刻 3.2 秒付近でロボットの転倒現象が開始していることが確認された。ここで、傾斜 17 度の斜面を歩行する基準歩容の様子を Fig. 15 に示す。Fig. 15 においても、時刻 4.0 秒で脚 1 が地面から浮いていることが目視できる。一方、傾斜適応歩容および左右揺動歩容は基準歩容に対して比較的小さなピッチ角速度であることが確認でき、転倒は生じなかったことがわかる。このように、転倒安定余裕が 0 になると、ロボットの転倒モーメントが生じ、動的に不安定であることが実験で確認できた。また、斜面歩行において傾斜適応歩容および左右揺動歩容の有効性を転倒安定余裕の観点から実験で確認できた。

続いて、また、傾斜 23 度の斜面を、ハイブリッド歩容、傾斜適応歩容、左右揺動歩容で歩

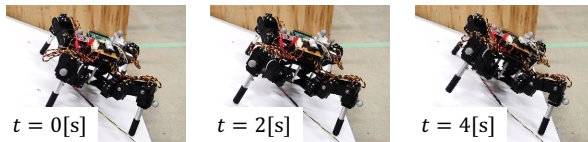


Fig. 15 Regular gait on 17 degrees slope

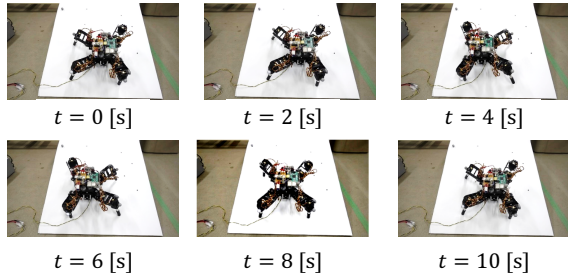


Fig. 16 Hybrid gait on 23 degrees slope

行したときのピッチ角速度を実験にて記録し、その結果を Fig. 14 に示す。

Fig. 14 から傾斜適応歩容および左右揺動歩容のピッチ角速度が非常に大きな値を示していることが確認でき、ロボットが不安定であることが確認できる。一方、ハイブリッド歩容時のロボットのピッチ角速度は、傾斜適応歩容および左右揺動歩容に対して比較的小きな値を示しており、安定して歩行した。したがって、実験からハイブリッド歩容の有用性を確認することができた。Fig. 16 にハイブリッド歩容の様子を示す。Fig. 16 から、ロボットは転倒を生じず、安定して歩行していることが確認できる。

本実験より、比較的緩やかな斜面を歩行する時は傾斜適応歩容や左右揺動歩容を実行して可操作度にゆとりをもたせる歩容を選択する。より急勾配な斜面を踏破するときはハイブリッド歩容を用いればロボットは安定して歩行することができる。このように、ハイブリッド歩容を導入することで、脚ロボットが斜面を踏破する時の歩行計画を行う時の選択肢が増え、より挑戦的な探査ミッションを実現できるようになる。

5. 結言

本研究では、斜面を歩行する四脚ロボットの歩容を、転倒安定余裕および可操作度の観点か

らシミュレーションおよび実験で評価した。実験において、本研究で提案したハイブリッド歩容が最も大きな転倒安定余裕を示し、斜面を安定して歩行する上で効果的であることを示した。

今後の展望として、凹凸環境において適応可能な歩容の生成や、把持可能な点が限定されている環境下でのモデル予測制御を用いた歩容生成が挙げられる。

参考文献

- 1) J. Haruyama et al., Possible Lunar Lava Tube Skylight Observed by SELENE Cameras, *Geophys. Res. Lett.*, vol. 36, issue 21, L21206 (doi:10.1029/2009GL040635), 2009.
- 2) K. Nagaoka et al., Passive Spine Gripper for Free-Climbing Robot in Extreme Terrain, *IEEE Robot. Automat. Lett.*, doi:10.1109/LRA.2018.2794517, 2018 (Early Access).
- 3) H. Adachi et al., Adaptive Gait for Quadruped Walking Robot Using Force Sensor, *Intelligent Autonomous Systems (edited by F. Groen et al.)*, IOS PRESS, Amsterdam, Netherlands, pp. 54-63, 1993.
- 4) A. Sprwitz et al., Towards Dynamic Trot Gait Locomotion: Design, Control, and Experiments with Cheetah-cub, a Compliant Quadruped Robot, *Int. J. Robot. Res.*, vol. 32, issue 8, pp. 932-950, 2013.
- 5) R. B. McGhee and A. A. Frank, On the Stability Properties of Quadruped Creeping Gaits, *Math. Biosci.*, vol. 3-3, pp. 331-351, 1968.
- 6) K. Yoneda and S. Hirose, Tumble Stability Criterion of Integrated Locomotion and Manipulation, *Proc. 1996 IEEE/RSJ Int. Conf. on Intel. Rob. Syst.*, pp. 870-876, 1996.
- 7) T. Yoshikawa, Manipulability of robotic mechanisms, *Int. J. Robot. Res.*, vol. 4, issue 2, pp. 3-9, 1985.
- 8) R. Kurazume, T. Hasegawa, and K. Yoneda, The Sway Compensation Trajectory for a Biped Robot, *Proc. 2003 IEEE Int. Conf. on Robot. Automat.*, pp. 925-931, 2003.