重心高さを生かした最適胴体姿勢を有する
4脚ロボットの斜面全方位静歩行*張 磊^{*1}, 馬 書 根^{*2}Omnidirectional Static Walking of a Quadruped Robot with
COG-Correspondent Optimal Body Postures on a SlopeLei ZHANG and Shugen MA^{*3}^{*3} Faculty of Engineering, Ibaraki University,
4-12-1 Nakanarusawa-cho, Hitachi-shi, Ibaraki, 316-8511 Japan

In this paper, we discuss COG-correspondent Optimal Body Postures (COBP) of a quadruped robot corresponded with optimal height of the center of gravity (COG) while performing omnidirectional walking on a slope. The COBP is the posture where the moving velocity is maximized corresponding to the height of COG, with respect to the slope and moving direction. The proposed method based on dynamically changing height of COG and body posture during gait-transitions, is used to maintain high robot motion velocity and stability on slope. Through computer simulation, the validity of the proposed method has been demonstrated. The stability has also been confirmed in computer simulation in gait-transition by means of static stability margin.

Key Words: Moving Robot, Optimal Control, Stability, Omnidirectional Static Walking, Height of COG, Optimal Body Posture, Successive Gait-transition

1. は じ め に

4脚ロボットは、あらゆる方向へ移動することができ、この能力を生かすことにより高度な運動性能と対地適応性を発揮してゆくものと期待されている。複雑な環境での運搬作業などの場合、移動速度よりも安定性が重視されているため、本研究では静歩行のみについて検討する。従来、歩行時の安定性を最大化する間歇クロール歩容⁽¹⁾や、直線間歇クロール歩容を拡張した適応歩容⁽²⁾などが提案され、4脚ロボットの斜面上の歩行を実現した。しかし、これらの歩容ではジサグザの重心移動、設定した4脚支持期間などによって、移動速度が明らかに低下している。また、歩行中にロボットの移動方向が変化した時、歩行パターンの切り替えが必要となるため、静歩行における歩容切り替えの歩行パターンとして踏み替え歩容⁽³⁾や、可動限界到達時の腳踏み換えルールに基づく操縦型歩行制御⁽⁴⁾などが提案されている。一方、筆者らは4脚ロボットの全方位移動性に注目し、クロール歩容と循環歩容を連続的に遷移させることにより4脚ロボットの水平面全方位静歩行⁽⁵⁾を実現している。また、筆者らは4脚

ロボットの高い対地適応性を有効に生かすために、水平面における全方位静歩行手法⁽⁵⁾を斜面上に拡張し、ロボットの胴体を水平に保った状態と胴体を斜面と平行にした状態での歩行について検討した⁽⁶⁾。脚可動範囲の大きさと脚基準位置のシフト量との間にトレードオフの関係が成り立つため、筆者らはさらに、斜面の傾斜角と移動方向に応じて、4脚ロボットの移動速度を最大にする最適な胴体姿勢について検討した⁽⁷⁾。しかし、これらの研究ではロボットの重心から接地面までの鉛直距離（重心高さ）が固定されたままであり、重心高さを積極的に変更して脚可動範囲を大きくしたり、脚基準位置のシフト量を小さくしたりすることによる移動速度や安定性の向上は考慮されていない。

そこで、本研究では斜面上における4脚ロボットの安定性と移動速度を向上するために、積極的に重心高さと胴体姿勢を変更させ、斜面の傾斜角と移動方向に応じて移動速度を最大にする重心高さを生かした最適な胴体姿勢(COBP)を明らかにする。さらに、このCOBPを有しながら安定、かつ連続的な斜面全方位静歩行を実現する。

2. 斜面上の全方位静歩行手法

本研究では、図1(a)に示す4脚ロボットを想定し、脚の機構的な可動限界から定まる真の可動領域の範囲内に収まる脚可動領域 A_i を設定する。この A_i は、図

* 原稿受付 2005年5月9日。

^{*1} 正員、茨城大学大学院理工学研究科(〒316-8511 日立市大成沢町4-12-1)。^{*2} 正員、茨城大学工学部。

E-mail: shugen@dse.ibaraki.ac.jp

Fig. 1 Robot model, leg movable area and region

Fig. 2 Coordinates Σ_α , Σ_β and Σ_γ

1(a)に示すような水平面上の基準姿勢をとった時の脚基準位置 c_i を中心とした8面体として取り扱う。この8面体は、筆者らが従来研究⁽⁵⁾で取り扱った、水平面の脚可動範囲である長方形を底面にし、脚の機構的な可動限界から求まる高さの上限と下限を2つの頂点に設定したものである。斜面における脚可動範囲 R_i は図1(b)に示すように A_i を斜面で切った時の切り口であり、 A_i と斜面との交線からなる多角形である。これは簡単に定式化でき、実時間での歩容計画を可能にしている。ただし、本論文で提案する手法は任意形状の A_i においても適用可能である。

2.1 斜面歩行における座標系の設定 本論文の4脚ロボットの歩行環境は一定の傾斜角 ψ を有する斜面とする。ロボットの重心高さは h 、胴体姿勢は Roll, Pitch, Yaw 3 軸回りの回転角度 ψ_{bR} , ψ_{bP} , ψ_{bY} で表す。図2に示すように右手座標系 Σ_α (胴体座標系)、 Σ_β (水平面座標系) と Σ_γ (斜面座標系) を設定する⁽⁷⁾。本研究では、歩容計画を Σ_γ で行い、歩行制御を Σ_α で行う手法を使用する。

2.2 斜面における脚基準位置 水平面歩行の場合、脚基準位置 c_i の配置は支持脚対角線 D_i 上に重心投影点 G_γ が乗ることを保証している。つまり、点 G_γ と D_i の交点は一致している。しかし、斜面歩行の場合、図3(a)に示すように、 G_γ のシフトに応じて斜面上にある c_i もシフトする必要がある。それぞれのシフト量は ΔG_γ と Δc_i で表す。そこで、 ΔG_γ と Δc_i は必ずしも一致しないため、本研究では次の条件を満たす任意の重心高さと胴体姿勢を維持した c_i を図4に示すアルゴリズムで求める。

脚基準位置の決定条件

1. c_i が構成する D_i が点 G_γ を通過すること、

Fig. 3 Calculation of common foot position (CFP)

Condition 1*: Point G_γ must be on the intersection of supporting leg diagonal lines for CFP

Fig. 4 CFP derivation algorithm

2. 最小安定余裕 S_{min} と最小ストローク $Stroke_{min}$ を設定し、保証すること、

アルゴリズムに使用する変数を以下のように定義する。

S_{hor} は斜面においてロボットが停止状態での安定余裕を表し、可能な限り、水平面上の基準位置をとったときの安定余裕値を用いる。 S_{mi} は安定余裕ラインを表し、図3(b)に示すように、 S_{hor} を維持した上で c_i を決定するため、 Σ_γ の X 軸の正負両側に引く2つの直線 ($X_\gamma = -S_{hor}$ と $X_\gamma = S_{hor}$) である。 R_i は各脚の脚可動範囲を $Stroke_{min}$ だけ狭めた新しい脚可動範囲を表す。

c_{ti} は仮脚基準位置を表し、次の方法で設定する。

- (a) c_{ti} を R_i と S_{mi} との交点が構成する線分の中点とする。
- (b) c_i の決定条件 (1) を満たすまで対角の脚を等角度で移動する。つまり、図3(b)に示すように、まず、(a) で設定した c_{ti} と原点 G_γ を構成する線分の角度 θ_i を

$$\theta_i = \text{atan2}(c_{tiy}, c_{tix}) \quad (i = 1 \sim 4) \quad (1)$$

のように求める。次に、対角脚の c_{ti} と G_γ を構成する線分を G_γ 回りに、等角 ϕ_i で回転し、回転後の支持脚対角線を D_i とする。角度 ϕ_i を次のように求める。

$$\phi'_i = \frac{\pi - (|\theta_j| + |\theta_{j+2}|)}{2}, \quad j = \begin{cases} 1 & (i = 1, 3) \\ 2 & (i = 2, 4) \end{cases} \quad (2)$$

Fig. 5 Three legs supporting period of crawl and rotation gait

$$\phi_i = \begin{cases} \phi'_i & (\theta_i \geq 0) \\ -\phi'_i & (\text{other}) \end{cases} \quad (i = 1 \sim 4) \quad (3)$$

最後に D_i と S_{mi} との交点 c_{ti} を求める。ここで、等角度で回転する理由としては、ロボットの全方位静歩行時、できる限り前後脚の変更量を同じするのが望ましいからである。以上のように求められた c_{ti} が R_i に存在する場合は、 c_i を c_{ti} に設定して終了する。存在しない場合は、 S_{hor} を減らし、新しい S_{hor} を用いて新しい S_{mi} を作成してから (a) の処理に戻る。

Error は S_{min} が保証されなかったり指定した重心高さと胴体姿勢では c_i が存在しなかったりということの意味する。このとき、ロボットは歩行不可となり、 c_i の決定アルゴリズムが終了する。

以上の設定により任意旋回中心回りのクロールと循環歩容に基づいた水平面の全方位静歩行手法⁽⁵⁾を斜面に拡張した。よって、4脚ロボットが斜面において全方位への連続的な静歩行を実現できる⁽⁶⁾⁽⁷⁾。さらに、移動速度と安定性の向上に重心高さと胴体姿勢を積極的に変更することが可能となる。

3. 重心高さによる安定性と移動速度への影響

まず、安定性の向上に関して、斜面に描かれる支持脚直線に対して重心高さの降下によって安定性が向上することが明らかにされている⁽⁸⁾。次に、移動速度の向上に関して、積極的に重心高さの変更によって脚基

Table 1 Changing of supporting leg diagonal lines D_i

Gait Type	D ₁	D ₂	D ₃	D ₄
X-crawl	$P_{11}-P_{12} \Rightarrow P_{22}-P_{23}$	$P_{22}-P_{23} \Rightarrow P_{33}-P_{34}$	$P_{33}-P_{34} \Rightarrow P_{44}-P_{45}$	$P_{44}-P_{45} \Rightarrow P_{15}-P_{16}$
Y-crawl	$P_{22}-P_{23} \Rightarrow P_{33}-P_{34}$	$P_{33}-P_{34} \Rightarrow P_{44}-P_{45}$	$P_{44}-P_{45} \Rightarrow P_{15}-P_{16}$	$P_{15}-P_{16} \Rightarrow P_{26}-P_{27}$
Rotation	$P_{22}-P_{23} \Rightarrow P_{33}-P_{34}$	$P_{33}-P_{34} \Rightarrow P_{44}-P_{45}$	$P_{44}-P_{45} \Rightarrow P_{15}-P_{16}$	$P_{15}-P_{16} \Rightarrow P_{26}-P_{27}$

準位置のシフト量 Δc_i を小さくしたり、脚可動範囲が大きくなったりすることで移動速度を高めることができる。具体的には、まず、 ΔG_γ は重心高さの変更によって変化する。脚基準位置の決定条件から、この G_γ の位置変化に伴って Δc_i が変化する。結果的に、重心高さを変更することで、 Δc_i は ΔG_γ と同じように減少できる。また、傾斜面上の脚可動範囲は脚可動領域（8面体）と斜面の交線からなる多角形であるため、重心高さの変更に伴った脚可動範囲の変化が移動速度の向上につながる容易に想定される。以上のことから、斜面において重心高さの変更が4脚ロボットの安定性と移動速度の向上に大きく寄与することが考えられる。

3.1 安定性評価指標 従来研究^{(5)~(7)}の静的安定条件は、安定余裕 S_M が非負 ($S_M \geq 0$) を満たすことである。 S_M は重心投影点から支持脚多角形の境界線までの最小距離である。しかし、 S_M には重心高さの変更による影響がない。 S_M に対して、重心高さによる安定性への影響を考慮するNE安定余裕 S_{NE} が提案された⁽⁸⁾。 S_{NE} は重心が転倒中に描く軌道の最高点 h_{max} と初期位置 h_0 との垂直距離の差 ($S_{NE} = h_{max} - h_0$) で表わされている。その最小値は0であるため、ロボットのある瞬間における安定性を判定できない。本研究では、ロボットのある瞬間における安定性を S_M の正負で判断し、重心高さの変更による安定性への影響を S_{NE} で評価する。

3.2 クロール歩容と循環歩容の安定性 クロール歩容では対角三角切り替え点 (DTE 点) が存在するので、 D_i に G_γ が乗る際に S_M と S_{NE} がともに0である。このとき、ロボットは安定的な歩行を行う保証がない。一方、循環歩容ではDTE点が存在しないので、クロール歩容より常に高い安定性が確保でき、安定的な歩行が行える。しかし、斜面において G_γ が斜面下方へシフトするため、斜面の傾斜角が大きくなったり重心高さが高くなったりすると、 D_i が G_γ の近傍になり、低い安定性のままの状態になる。本研究ではデューティ比 β を0.75に設定するため、4脚支持期間が一瞬的に存在するものの、全体的に安定性の向上には影響しない。よって、次節でクロール歩容と循環歩容に対して3脚支持期間の安定性について詳細に検討する。

Table 2 The experience value of S_{NEAvg}

Walking Environment	Gait Type	ψ_{bR} [deg]	ψ_{bP} [deg]	ψ_{bY} [deg]	Hcoq [m]	SNEAvg [mm]
Horizontal plane	X-Crawl	0	0	0	0.243	2.685
	Y-Crawl					0.535
Inclination angle of Slope ($\psi=10$ [deg])	X-Crawl	0	10	0	0.243	1.178
	Y-Crawl					0.476
	X-Crawl	10	0	90		2.526
	Y-Crawl					0.128

Table 3 Specifications of robot model and parameters

Robot Size (standard posture) [mm]	400(W)×600(L)×250(H)
Leg movable area (basal plane) [mm]	300(W)×200(L)
Leg movable area (height) [mm]	160(Top), -140(Bottom)
Inclination angle of slope (ψ) [deg]	10.0
Initial value of S_{hor} [m]	0.2
Minimum stability margin (S_{min}) [m]	0.2
Minimum average value of S_{NEAvg} (S_{NAmin}) [mm]	0.128
Minimum stroke ($Stroke_{min}$) [m]	0.001

3.3 3脚支持期間の安定性

クロール歩容と循環歩容では X,RX,Y,RY 型クロール, O,RO 型循環の6つに分類することができる⁽⁵⁾。まず, X,Y 型クロール歩容, O 型循環歩容に対して, 1周期内の遊脚と支持脚の切り替え順序を図5に示す。支持脚の脚軌道に遊脚の着地位置から支持脚の終了位置への順番で番号を付ける (P_{ij} : 脚 i の位置 j)。支持脚対角線 D_i を $P_{ij} - P_{mn}$ のように表し, 3脚支持期間の D_i の位置移動を表1に示す。例として, Xクロールで脚1が遊脚となる場合, 図5(a)に示すように, 支持脚三角形が $P_{21} - P_{33} - P_{42}$ (実線) から $P_{22} - P_{34} - P_{43}$ (破線) まで移動し, 一定の移動速度でロボットの胴体を推進する。このとき, D_i は $P_{21} - P_{42}$ から $P_{22} - P_{43}$ への移動となる。よって, 3脚支持期間の D_i の位置変化がロボットの安定性に大きく影響することが明らかである。また, 一定の傾斜角を有する斜面において, このような D_i の位置移動による S_{NE} の変化は非線形であることも判明している⁽⁸⁾。そこで, 3脚支持期間にロボットが一定の移動速度で歩行を行うため, 本研究ではその期間内の S_{NE} の平均値を用いる。表1に示す1周期内にある4つの D_i の変化に対して S_{NE} の平均値を求め, 得られる値のうち小さい方(最小値)を3脚支持期間の S_{NE} の平均値 S_{NEAvg} とする。また, 表1の矢印($\Rightarrow$)の方向を逆にすることで, RX,RY 型クロール歩容, RO 型循環歩容に対する S_{NEAvg} が得られる。

従来研究⁽⁵⁾⁽⁶⁾で行った実機実験の各パターンについて S_{NEAvg} を求め, 表2に示す。その内, S_{NEAvg} が最も小さい ($\psi=10$ [deg], $\psi_{bY}=90$ [deg] での Y クロールを行う) 場合でも, 重心位置のモデル化誤差によるロボットの転倒がなく, 斜面上の歩行が実現されている。本報告では, この実験結果による経験値 ($S_{NAmin}=0.128$ [mm]) を用いる。

Fig. 6 COBP of the specified moving direction

Fig. 7 COBP of the arbitrary moving direction

4. 重心高さを生かした最適な胴体姿勢 (COBP)

本章では, 斜面において4脚ロボットの歩行中に指定した S_{NAmin} を維持した上で, 斜面の傾斜角と移動方向に応じて移動速度を最大化するロボットの重心高さと胴体姿勢の最適化問題を検討する。胴体姿勢, または重心高さを変更した場合, 多角形となる脚可動範囲 R_i がこれらの変化に応じて変化するため, このような最適化問題を定式化することが困難である。そのため, 本研究では制約付き非線形最適化問題となる COBP の誘導に逐次2次計画法 (SQP 法)⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾を用いる。クロール歩容では任意の移動方向及び指定された方向, 循環歩容ではその場の旋回について COBP を求める。ロボットのモデルとしては実機 TITAN-VIII の仕様を用いる (表3)。斜面において, 制約条件 ($S_{NEAvg} \geq S_{NAmin}$) を満たしながらロボットの重心高さと胴体姿勢の変化に伴うストローク長 S_k と回転角度 R_a を検討する。但し, ロボットは対称的な機構であるため Yaw 角の検討範囲を $0[\text{deg}] \leq \psi_{bY} \leq 90[\text{deg}]$ とする。

4.1 移動方向指定のクロール歩容 移動方向が指定された場合, その方向に対して最大移動速度 (最大 S_k) が取れる重心高さと姿勢を求める。具体的な

Fig. 8 COBP of the rotation gait

例として、移動方向が胴体方向の左前方 $30[\text{deg}]$ での X クロールについて検討する。図 6 に示すように、ロボットから見た斜面の方向角度 $\psi_{bY}=35.0[\text{deg}]$ となったとき、移動方向がほぼ長方形となっている R_i の対角線と一致するため、 S_k が最大となっていることが分かる。ここで、図 6 の (a) に示す点 A はロボットの方向が斜面の傾斜方向と一致する ($\psi_{bY}=0.0[\text{deg}]$) 場合、点 B はロボットから見た斜面の傾斜方向が 90 度となる ($\psi_{bY}=90.0[\text{deg}]$) 場合の COBP である。

4.2 任意方向のクロール歩容 移動方向が指定されない場合、COBP はロボットが停止状態から任意の移動方向に対して、最大 S_k が取れる重心高さで姿勢である。即ち、全ての方向に対して 4 つの脚のうち、出し得る S_k の最小値が最も大きく取れる重心高さで姿勢を最適解とする。図 7 に示すように、 $\psi_{bY}=0.0[\text{deg}]$ から Yaw 角が増加するものの、出し得る S_k が単調に減少してしまう。これは、任意方向のクロール歩容を考えると Y クロール方向に対して取れる S_k が全体のネックとなっているためと考えられる。図 7(a) に示す点 A では、脚基準位置 c_i が斜面下方へシフトするため、Y クロール方向への影響はない。このとき、Y クロール方向の S_k がほぼ長方形となっている R_i の幅となっているため、最大となっていることが分かる。しかし点 B では、 c_i のシフトによる Y クロール方向への影響が最も大きく、このときの S_k が最小となっていることが分かる。

4.3 循環歩容 循環歩容ではその場の旋回について最大旋回角速度が得られる重心高さで姿勢を求める。図 8 に示すように、 $\psi_{bY}=0.0[\text{deg}]$ から Yaw 角が増えるにつれ、 R_a が減少する。 $\psi_{bY}=40.0[\text{deg}]$ の場合、 R_a が最小となり、その後、Yaw 角の増加にともなって R_a が再び増大することが分かる。この対称的な変化は、 R_i がほぼ長方形となっているためと考えられる。以上の導出結果から、COBP を有しながら循環歩容を行う際、ロボットの方向に応じて重心高さで胴体姿勢が時々刻々と変化することが分かる。

ここで、本章で提案した COBP の導出をオフライン

で行ったことを指摘しておきたい。しかし、導出した最適解をデータベースにし、斜面の傾斜角、ロボットの移動方向に対応する新しい歩容の COBP をデータベースのデータより補間している。今後、実時間での導出について別報で検討する予定である。

5. COBP を有する連続的な歩容遷移

斜面において移動速度を最大にする COBP を有する連続的な歩容遷移を次の手順で実現する。歩行中に新しい旋回中心が与えられた場合、まず、新しい旋回中心による歩容選択を行い⁽⁵⁾、新しい歩容に対して COBP を求め、新しい COBP の脚可動範囲 R_i における脚位置を求める。次に、脚を新しい歩容の脚位置へ順次動かしていき、次に示す条件を満たす遊脚期間で新しい重心高さで胴体姿勢へ変更 (CB 変更) することで、連続的な歩容遷移を実現する。

CB 変更の条件

1. 安定余裕が 0 より大きいこと、

2. 全ての脚が新しい COBP の R_i に存在すること。

ここで、脚を新しい位置へ動かしていく脚移動順序、CB 変更の時刻は歩容遷移パターンに依存する。本研究の脚移動順序として文献⁽⁵⁾のものをを用いる。歩容遷移パターンはクロール歩容と循環歩容の間の遷移であり、図 9 に示すようにクロールからクロール (a)、クロールから循環 (b)、循環からクロール (c)、循環から循環 (d) の 4 つに分類できる⁽⁵⁾。図中、U は Step1 で遊脚化する脚、C は脚 U の対角にある脚、(a) と (c) の場合、A は脚 U と C 以外で遷移前の進行方向に対して前脚となる脚、(b) と (d) の場合、A は遷移後の遊脚順序が脚 U の次になる脚、B は脚 A の対角にある脚となる。次に CB 変更の時刻について述べる。

(a) では Step1 の遊脚が遷移後の進行方向に対して前脚となる場合は Case1、後脚となる場合は Case2 という二つのケースに分けられる。Step1 の実線部分は遷移前の COBP における R_i を示し、その内部にある点線は新しい歩容の COBP における新しい R_i である。ここで、Case1、Case2 とともに Step1 で CB 変更を行うと、脚 C の終了位置 C_{end} が新しい R_i (図 9(a-1) 中の Step2 の実線、(a-2) 中の Step2 の点線を示している部分) として保証できない。そのため、CB 変更の時刻はケースによって次のようになる。

Case1: Step2 では脚 A と B が基準位置にあり、脚 U が新しい歩容の脚位置にある。このとき、CB 変更の条件を満たしているため Step2 で CB 変更を行うことができる。図 9(a-1) の Step2 に示すように、 R_i を点線 (遷移前の COBP における R_i) から実線 (新しい

Fig. 9 All gait-transition patterns

COBP の R_i) へ変更した。

Case2: Step2 では胴体の移動を遊脚時間 1 回分だけ停止させ、進行方向に支持脚三角形が形成されるのを待つ必要がある。この場合、安定余裕が 0 であるため、CB 変更を行わない。Step3 では脚 A と B が基準位置、脚 C が新しい歩容の脚位置にあり、**Step3** で CB 変更を行うことができる。

(b) では図 9(b-1) と (b-2) に示すように、Step2 の脚 A が遊脚化可能であるかどうかによって二つのケースに分られる。Case1, Case2 とともに Step3 の脚 B が基準位置、脚 U と A が次の歩容の脚位置にあり、CB 変更の条件を満たしているため、**Step3** で CB 変更を行うことができる。

(c) ではどのような脚配置であっても歩容遷移が実行可能であり、**Step3** で CB 変更を行うことができる。

(d) でもどのような脚配置からでも実行可能である。歩容遷移を行う際、重心高さと胴体姿勢はロボットの方向に応じて時々刻々の実行となる。本研究では循環歩容についてその場の旋回の COBP を有する全方位静歩行を検討対象とするため、遷移前後の脚軌道の 2/3 は同じである。よって、Step1 で脚 U だけを遷移後の脚位置に動かせば最も早く歩容遷移を完了する。

以上で、COBP を考慮する上で連続的な歩容遷移手順を設計した。歩容遷移中に重心高さと胴体姿勢の変更、胴体の推進運動をも考慮しているため、遷移後に確実に高い移動速度で安定した歩行を実現することができる。

6. シミュレーション実験

安定性を考慮した積極的に重心高さと胴体姿勢の変更による移動速度と安定性の向上、COBP を有する全方位静歩行の有効性を検証するため、シミュレーション実験を行った。モデルは実機 TITAN-VIII の原寸を用い、 $\psi = 10[\text{deg}]$ とする。遊脚時間は 1.0[s] に固定する。

6.1 COBP による安定性と移動速度の向上について 本研究では、導出された COBP(1)、胴体の重心高さが一定で、姿勢としては水平(2)、斜面と平行(3)、筆者らが導出した最適な姿勢(4)⁽⁷⁾という4つの場合について次の実験を行った。

実験 1: 移動方向指定のクロール歩容 具体的な例として、ロボットの方向が $\psi_{bY} = 60[\text{deg}]$ の場合、X と Y クロールの歩行シミュレーション実験を行った。表 4 は実験結果で、 S_{NEAvg} と移動速度及びそれぞれの向上率を示す。向上率は胴体水平時の S_{NEAvg} と移動速度を比較した結果である。この結果から、(1)における移動速度と安定性が大幅に向上していることが明らかである。

実験 2: 任意方向のクロール歩容 ロボットの方向が $0 \leq \psi_{bY} \leq 90[\text{deg}]$ の範囲内で X と Y クロールの歩行シミュレーション実験を行った。図 10 に示すように、(1)における X クロールの安定性と移動速度は最大になっていない。しかし、Y クロールの場合はロボットの移動速度が最も速く、安定性が最も高いことが分かる。その理由としては、4脚ロボット TITAN-VIII の

Table 4 Specified moving direction ($\psi_{bY}=60[\text{deg}]$)

Body Posture	Gait Type	ψ_{bY} [deg]	ψ_{bR} [deg]	ψ_{bP} [deg]	Hcog [m]	Moving Speed [m/s]	Increase Rate [%]	Average SNE [mm]	Increase Rate [%]
Body horizontal	X-Crawl	60	0.0	0.0	0.243	0.0376	0.0	0.674	0.0
Parallel to a slope			8.7	5.0	0.243	0.0631	67.8	1.790	166.6
OBP(Hoog fixation)			8.7	4.3	0.243	0.0657	74.7	1.978	193.4
COBP			8.6	4.1	0.230	0.0684	81.9	2.102	211.8
Body horizontal	Y-Crawl	60	0.0	0.0	0.243	0.0241	0.0	0.129	0.0
Parallel to a slope			8.7	5.0	0.243	0.0308	27.8	0.197	52.7
OBP(Hoog fixation)			7.8	5.6	0.243	0.0334	38.6	0.232	79.8
COBP			7.1	5.6	0.220	0.0417	73.0	0.258	100.0

OBP: optimal body posture with fixed Hoog

COBP: COG-correspondent optimal body posture

Fig. 10 X, Y-Crawl gait of arbitrary moving direction

構造上、縦に比べて相対的に脚可動範囲の横幅が短く、Yクロールの安定性と移動速度が最も低いものである。そのため、任意方向のクロール歩容を考えると、設定した S_{NAmin} を確保した上で移動速度を最大にすることで、最も低かったYクロールの移動速度が大きくなって、高かったXクロールの移動速度が小さくなっている。しかし、Xクロールの安定性と移動速度はYクロールより十分大きいので、任意方向のクロール歩容での全方位歩行には影響しない。

表5は、 $\psi_{bY}=0$ と $\psi_{bY}=90[\text{deg}]$ の場合におけるXとYクロールの実験結果を示す。この結果から、 $\psi_{bY}=90[\text{deg}]$ でYクロール歩行を行ったとき、(3) (図10(b)に示す④点)では移動速度の向上率が負になり、(4)でもその向上率がわずかである。(3)と(4)の安定性がいずれも低い。それに対して、(1)における歩行の移動速度は(⑥点)最も速く、安定性が(③点)大幅に向上していることが分かる。

実験3: 循環歩容 ロボットの方向が $0 \leq \psi_{bY} \leq 90[\text{deg}]$ の範囲内で、その場の旋回歩行シミュレーション実験を行った。図11に示すように、(1)における歩行の旋回角速度が最も速いことが分かる。 $\psi_{bY}=60[\text{deg}]$ 前後の場合に、(2)での移動が遅くなるのに対して、(1)の歩行ではより速い旋回角速度で移動していることも

Table 5 Arbitrary moving direction

Body Posture	Gait Type	ψ_{bY} [deg]	ψ_{bR} [deg]	ψ_{bP} [deg]	Hcog [m]	Moving Speed [m/s]	Increase Rate [%]	SNEAvg [mm]	Increase Rate [%]
Body horizontal	X-Crawl	0	0.0	0.0	0.243	0.0478	0.0	1.088	0.0
Parallel to a slope			0.0	10.0	0.243	0.0515	7.7	1.189	9.3
OBP(Hoog fixation)			0.0	9.4	0.243	0.0548	14.6	1.356	24.6
COBP			0.0	10.0	0.247	0.0512	7.1	1.095	0.6
Body horizontal	X-Crawl	90	0.0	0.0	0.243	0.0465	0.0	1.033	0.0
Parallel to a slope			10.0	0.0	0.243	0.0720	54.8	2.492	141.2
OBP(Hoog fixation)			9.5	0.0	0.243	0.0723	55.5	2.506	142.6
COBP			6.2	0.0	0.221	0.0646	38.9	2.056	99.0
Body horizontal	Y-Crawl	0	0.0	0.0	0.243	0.0374	0.0	0.297	0.0
Parallel to a slope			0.0	10.0	0.243	0.0483	29.5	0.480	61.6
OBP(Hoog fixation)			0.0	9.4	0.243	0.0486	29.9	0.484	62.9
COBP			0.0	10.0	0.247	0.0493	31.8	0.449	51.2
Body horizontal	Y-Crawl	90	0.0	0.0	0.243	0.0249	0.0	0.150	0.0
Parallel to a slope			10.0	0.0	0.243	0.0233	-6.4	0.128	-14.6
OBP(Hoog fixation)			9.5	0.0	0.243	0.0253	1.6	0.147	-2.0
COBP			6.2	0.0	0.221	0.0354	42.2	0.206	37.3

Fig. 11 Rotation gait

判明した。また、 S_{NEAvg} が常に最大ではないものの、設定された S_{NAmin} より十分大きいであるため、安定かつ旋回角速度最大の循環歩容が実現できることが分かる。

6.2 COBPを有する連続的な歩容遷移について 本研究では、誘導されたCOBPを用いて全ての歩容遷移パターンについてシミュレーション実験を行った。歩容遷移時における胴体重心の移動軌跡、対応する安定余裕の変化と各脚の支持脚・遊脚状態、胴体姿勢及び重心高さの変化を図12に示す。図中の①～⑥は歩容遷移パターンを示している。また、(a)の番号(1,2,...,33)はロボットの歩行ステップを示し、(b)～(d)中の横軸の番号と一致する。各歩容遷移において歩行中に安定余裕が負になることはなく安定であることが確認できた。

歩容遷移中にロボットの胴体姿勢と重心高さの変更を説明する例として、ロボットの方向が $\psi_{bY}=60[\text{deg}]$ の①の場合を考える。ステップ1,2ではロボットがXクロール歩容に対するCOBP($\psi_{bR}=8.6[\text{deg}]$, $\psi_{bP}=4.1[\text{deg}]$, $Hcog=0.230[\text{m}]$)を有しながらXクロール歩容で直進している。3では脚4(右前脚)が遊脚となり、歩容遷移を開始する。4では①のStep2に入り、このとき、新しい歩容のYクロール歩容におけるCOBPは $\psi_{bR}=7.1[\text{deg}]$, $\psi_{bP}=5.6[\text{deg}]$, $Hcog=0.220[\text{m}]$ であるため、Roll角を $8.6[\text{deg}]$ から $7.1[\text{deg}]$ へ、Pitch角を $4.1[\text{deg}]$ から $5.6[\text{deg}]$ へ姿勢変更を行い、Hcogを $0.230[\text{m}]$ から $0.220[\text{m}]$ へ重心高さの変更を行う。5

Fig. 12 Simulation result of all gait-transition patterns

で歩容遷移が完了し、ステップ6～8ではYクロール歩容で直進することを示している。

7. お わ り に

本論文では、斜面における4脚ロボットの安定性と移動速度を向上するために、積極的に重心高さと胴体姿勢を変更し、斜面の傾斜角と移動方向に応じて移動速度を最大にする重心高さを生かした最適な胴体姿勢(COBP)を明らかにした。また、そのCOBPを維持する連続的な歩容遷移手法を提案した。提案した手法を用いて、4脚ロボットは斜面において、安定かつ連続に、最大の移動速度を維持した全方位静歩行を実現していることをシミュレーション実験により確認し、従来の全方位静歩行と比べて著しく移動速度、安定性を高く保ち得ることが明らかとなった。

文 献

(1) 塚越・広瀬, 間歇クロール歩容の提案とその生成原理, 日本ロボット学会誌, 17-2, (1999)145-152.

(2) A. Konno, K. Ogasawara, Y. Hwang, E. Inohira and M. Uchiyama, An Adaptive Gait for Quadruped Robots to walk on a Slope, Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS2003), (2003)589-594.
 (3) 広瀬・横井, 4足歩行機械の踏み変えに関する研究, 日本ロボット学会誌, 4-4, (1986)364-372.
 (4) 安達ほか6名, 可動限界到達時の腳踏み換えルールに基づく4脚ロボットの操縦型歩行制御, 日本ロボット学会誌, 16-3, (1998)329-336.
 (5) 富山・馬・和田, クロール歩容と循環歩容に基づく4足ロボットの全方位歩行, 日本ロボット学会誌, 20-3, (2002)85-92.
 (6) 本田・馬・井上・張, 斜面における4脚ロボットの全方位歩行, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会, 講演論文集 (CD-ROM), (2004)1A1-L1-57.
 (7) L. Zhang, S. Ma, Y. Honda and K. Inoue, Omni-directional Walking of a Quadruped Robot with Optimal Body Postures on a Slope, Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation (ICRA2005), (2005)2987-2992.
 (8) 広瀬・塚越・米田, 不整地における歩行機械の静的安定性評価基準, 日本ロボット学会誌, 16-8, (1998)1076-1082.
 (9) 茨木, 福島:最適化の手法, nos.4, 共立出版, 1993.
 (10) 茨木, 福島:最適化プログラミング, nos.4,7, 岩波書店, 1991.
 (11) K. Arikawa and S. Hirose, Development of quadruped walking robot TITAN-VIII, Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS1996), (1996)208-214.