

博 士 学 位 論 文

傾斜面における4脚ロボットの全方位  
静歩行に関する研究

Study on Omnidirectional Static Walking of a  
Quadruped Robot on a Slope

平成 18 年 3 月

茨城大学大学院理工学研究科

生産科学専攻

張 磊



# 論文要旨

脚移動ロボットはその高い対地適応性を活かすことで様々な環境における移動・作業用プラットフォームとして活躍することが期待されている。脚移動ロボットは複雑な環境で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災害地での人命救助や地雷撤去、建設現場での作業などに利用することができる。

従来、脚運動は動物に見られるような周期的な運動を当てはめて、クロール歩容やクロール歩容の進行方向を一般化した基準側行歩容や任意の旋回中心回りにおける旋回角速度の最大化を図る基準旋回歩容などのような定常的な歩行パターンが提案されていた。また、歩行中にロボットの歩行方向を変更する時に歩行パターンの切り替えのために、踏み替え歩容や可動限界到達時の踏み換えルールに基づく操縦型歩行制御などが提案されていた。一方、本研究室では4脚ロボットが最も安定に歩行できる静歩行に議論を限定し、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を実現している。この全方位静歩行は任意旋回中心回りのクロール歩容と循環歩容を有機的に組み合わせることにより実現される全方位への連続的な静歩行である。4脚ロボットが全方位静歩行を行うことで、障害物が多く存在する環境においても移動が可能であり、重い荷物を運搬する際にロボットの不連続運動で生じる慣性力による不安定化の問題も解消できる。この全方位静歩行を実現する手法では、遷移前後の歩容で共通の脚配置（脚基準位置）が存在するように設計することによって少ない歩数で歩容遷移を完了することができ、移動効率を向上することが確認されている。また、その4脚ロボットの高い対地適応性を有効に生かすために、傾斜面における全方位静歩行への拡張を行い、胴体を水平に保ったままでの傾斜面上の歩行や、胴体を傾斜面と平行にした状態での歩行についても検討を行った。胴体水平の場合、搬送作業などには有利であるものの、傾斜面の傾斜角が大きくなると脚可動範囲が小さくなり、移動速度が著しく低下してしまう。胴体を傾斜面と平行にした状態の場合、連続的な歩容遷移を行うために設定した脚基準位置を胴体傾斜に応じてシフトさせる必要があるため、傾斜面の傾斜角に応じて脚基準位置のシフト量が大きくなり、使用可能な脚可動範囲が結果的に狭くなってしまふ。即ち、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っている。

そこで、本研究ではまず、傾斜面歩行環境に応じて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、その最適な胴体姿勢を有しながら傾斜面において連続的に歩容遷移を行う手法を提案する。傾斜面における最適な胴体姿勢としては、クロール歩容に対して任意の移動方向及び指定された方向、循環歩容に対してその場の旋回について導出した移動速度を最大にする胴体姿勢である。これらの歩容を組み合わせることによって最適な胴体姿勢を有する全方位静歩行を実現している。しかし、これまで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．本研究ではさらに，傾斜面における4脚ロボットの安定性の向上，移動速度の最大化及び全方位静歩行の実現を統合的に議論し，積極的に重心高さと胴体姿勢を変更することによって傾斜面の傾斜角とロボットの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を明らかにする．なお，その重心高さを生かしながら最適な胴体姿勢を有する連続的な歩容遷移手法を提案する．重心高さを活かしながら最適な胴体姿勢の誘導には3脚支持期間の安定性を考慮して，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，確実に速い移動速度で安定した斜面全方位静歩行を実現している．

本論文ではまず，1) 水平面における全方位静歩行の実現手法について述べ，その手法を傾斜面に拡張し，胴体姿勢と重心高さを任意にさせた状態での斜面全方位静歩行を実現する方法について述べる．次に，2) 勾配法を用いて非線形最適化問題となる最適な胴体姿勢の誘導法について述べ，その最適な胴体姿勢を有しながら傾斜面において連続的に歩容遷移を行う手法を提案する．また，3) 重心高さによる安定性と移動速度への影響について検討し，その安定性の検討に必要な3脚支持期間の安定性について詳細に述べる．そして，4) 逐次2次計画法を用いて安定性を考慮した制約付き非線形最適化問題となる重心高さを生かした最適な胴体姿勢を誘導し，誘導した重心高さを生かした最適な胴体姿勢を有しながら傾斜面において連続的に歩容遷移を行う手法を提案する．最後に，5) 計算機実験および実機実験により，提案する手法の有効性を検証する．

計算機実験および実機実験より，1) 安定性を考慮した積極的に重心高さと胴体姿勢を変更する手法は，従来の全方位静歩行と比べて著しく移動速度を向上し，安定性をも高く保ち得ること；2) 重心高さを生かした最適な胴体姿勢を用いて，傾斜面の傾斜角とロボットの移動方向に応じて移動速度を最大にする全方位静歩行が実現できること；3) 提案する手法を用いて4脚ロボットは傾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明らかにしている．

---

# ABSTRACT

The legged robot was expected to be an environment accessible platform because of its environmental adaptability and characteristic of the movement in any decided direction. With their high adaptability to the environment, legged robots have been considered for a wide variety of applications outside their traditional factory setting. Those applications often require life saving in a disaster stricken district, operation in a construction field, etc. With consideration of stability and energy consumption, the quadruped walking robot will be one of the most practical locomotion machines to move about on uneven terrain and is stablest while walking in static state. Quadruped robots have advantages over wheeled robots in walking on an irregular terrain and walking into any direction.

Researches on quadruped robots have been widely carried out, and studies of quadruped gaits can be divided in two parts according to the nature of the stability, static stability or dynamic stability. Static stability assumes that the vertical projection of the *center of gravity* (COG) remains always inside the stability polygon with an adequate stability margin during all phases of movements. The stability margin ensures that whatever speed the robot can reach it will not be carried away by its own momentum and consecutively tip over and fall down. Fukuoka et al. realized dynamic walking of a quadruped robot on irregular terrain using a neural system method. However, the robot should rather aim for high stability than achieving high speed when the task is conveyance. In this study, we focused on the static walking of a quadruped robot for its static stability. This must be important for the case of considering the carriage of heavy goods. Note that the static stability assumes that the vertical projection of the COG remains always inside the stability polygon with an adequate stability margin during all phases of movements.

The crawl gait introduced by McGhee appeared to be very close to the walk widely seen in mammals at low speed. For the robot to perform movement in any decided direction, Hirose et al. extended the crawl gait to a standard side-walking gait. Hirose also introduced rotation gait that gives the maximum angular velocity around any turning center. For increasing stability, Tsukakoshi et al. proposed the intermittent crawl gait and Konno et al. proposed an adaptive intermittent crawl gait. Because of the zigzag trajectory or 4-leg support period used by a quadruped robot on a slope, its motion speed is generally slow. Moreover, the semi-autonomous walking of a quadruped robot based on leg transition at the border of the leg work space has been proposed, and the gait-transitions between forward, backward, left and right turning and rotation motion have been discussed in cooperation of sideways motion of body. However, the omnidirectional static

walking has not been perfectly performed by the former algorithms.

For the robot to perform its movement in any decided direction, we have discussed the successive gait-transition method for a quadruped robot to realize omnidirectional static walking on horizontal plane among the crawl gaits and the rotation gaits. It successively performed gait-transition stably and continuously with the least number of steps using the *common foot position* (CFP: a leg position common to two gaits before and after gait-transition). The gait transition technique chooses the crawl gait or rotation gait from the turning center and transfers a gait from one to another continuously when changing the turning center. However, applicable environment for the method was restricted to horizontal plane only, and therefore, the quadruped robot could not exhibit high adaptability to environments. Here, we have considered an extension to the omnidirectional static walking on a slope. When we think of walking on a slope, it is required to keep the body posture horizontal when the task for the robot is conveyance. But in such case, there will occur a problem that the leg movable region becomes narrow and the moving speed will become slow. In order to improve the moving speed of robot, we discussed the body posture with the largest leg movable region. That is the body posture paralleled to the slope. However in this case, it is necessary to shift the CFP to perform the successive gait-transition. The available leg movable region will become narrow, and therefore, moving speed also decreases. Due to this reason, it is necessary to discuss the relation between the moving speed and the body posture, and derive the body posture that gives the fastest moving speed on a slope.

Moreover, we have discussed the optimal body postures of a quadruped robot to perform omnidirectional static walking on a slope. The optimal body posture is the posture with the maximum possible moving speed w.r.t. slope and moving direction. For crawl gait, we derive the optimal body posture for specified moving direction and the arbitrary direction. For rotation gait, we derive it from rotation on the spot. By combining them, the omnidirectional static walking with the optimal posture can be realized. In these researches, the height from the center of gravity to slope (height of COG) to the slope was restricted to a fixed value. However, it was not used effective in improvement in motion speed, and improvement in stability by changing the height of COG positively by enlarging the leg movable region or making small the amount of shifts of CFP. Igarashi et al. proposed the trajectory following gait in which a robot changes its body posture or the height of COG to avoid obstacles. However, the integration-research of improvement in stability (1), maximization of moving speed (2), and realization of omnidirectional static walking (3) by changing the height of COG or the body postures positively was not discussed.

In this paper, we propose a method for quadruped robots integrating (1) static

walking with high environmental adaptability, (2) omnidirectional movement (3) successive gait transition, (4) the fastest motion speed, and (5) stability. We discuss *COG-correspondent optimal body postures* (COBP) of a quadruped robot corresponded with optimal height of the COG while performing omnidirectional static walking on a slope. The COBP is the posture where the motion velocity is maximized corresponding to the height of COG considering stability, w.r.t. the slope and moving direction. Successive gait transition with a minimum number of steps is realizable using common foot position before and after gait transition. The time required to transit between gaits is reduced by carefully designing foot position in crawling and rotating while limiting foot reachable region on a slope. The robot thus walks into any direction fastest and statically with COBP based on dynamically changing height of COG and body posture during gait transitions. By the proposed method, the quadruped robot could move without stopping in all directions with COG-correspondent optimal body postures on a slope. Through walking experiments by computer simulation, the validity of the proposed approach has been verified. The stability has also been confirmed in the computer simulation in gait transition by a measure of static stability margin.

The first chapter expounds the contents of the background, objectives and layout of the dissertation.

The second chapter describes the realization method of the omnidirectional static walking in the level surface and how to realizing this method on a slope with specified height of COG and body posture. Since the omnidirectional static walking with specified height of COG and body posture on a slope is realized, enabling us to consider the influence on motion speed and stability.

The next chapter introduces a search method of the optimal body posture that gives the fastest motion speed on a slope, A method of successive gait-transition with optimal body posture is proposed.

The next chapter proposes an average value of the stability margin in 3-leg support period using normalized energy stability to consider an improvement in stability by changing the height of COG. It is the most desirable stability criterion for a quadruped robot walking on a slope proposed by Hirose et al. This chapter also discusses the COBP and a method of performing a successive gait-transition on a slope with the COBP. To solve the optimization problem of the COBP, which poses a nonlinear-with restrictions optimization problem in consideration of stability the successive quadratic programming (SQP) is used, which is a typical method for nonlinear optimization problem with constraint. The proposed method based on dynamically changing height of COG and body posture during gait-transitions that is used to maintain high robot motion velocity and stability on slope. So that the robot can move into all direction speedily, statically and continuously with a minimum number of steps through common foot position (CFP) design.

In the last chapter, computer simulations and experiments demonstrate the validity of the proposed methods. Using proposed methods, a quadruped robot can realize the omnidirectional static walking on a slope with COBP that maintained the stable and maximum moving speed successive. The moving speed and stability can be kept remarkably high in omnidirectional static walking on a slope, in comparison with current research.

# 目次

|            |                          |           |
|------------|--------------------------|-----------|
| <b>第1章</b> | <b>序論</b>                | <b>1</b>  |
| 1.1        | 脚移動ロボット                  | 2         |
| 1.2        | 従来の研究                    | 7         |
| 1.2.1      | 動物の歩行パターン                | 11        |
| 1.2.2      | 脚移動ロボットの安定性評価基準          | 14        |
| 1.2.3      | 4脚ロボットの制御                | 17        |
| 1.2.4      | 4脚ロボットの全方位静歩行            | 19        |
| 1.3        | 本研究の目的                   | 27        |
| 1.4        | 本論文の構成                   | 28        |
| <b>第2章</b> | <b>傾斜面における全方位静歩行</b>     | <b>29</b> |
| 2.1        | はじめに                     | 30        |
| 2.2        | 傾斜面上の全方位静歩行手法            | 31        |
| 2.2.1      | 座標系の設定                   | 31        |
| 2.2.2      | 脚可動領域と脚可動範囲              | 32        |
| 2.2.3      | 傾斜面における脚基準位置             | 34        |
| 2.3        | 傾斜面における基準歩容の計画           | 39        |
| 2.3.1      | 旋回中心位置の導出                | 39        |
| 2.3.2      | 旋回中心位置による歩容の選択           | 41        |
| 2.3.3      | 遊脚着地位置と支持脚終了位置           | 41        |
| 2.3.4      | 脚先端軌道の計画                 | 47        |
| 2.4        | 傾斜面における連続的な歩容遷移          | 48        |
| 2.4.1      | クロール歩容からクロール歩容への遷移       | 49        |
| 2.4.2      | クロール歩容から循環歩容への遷移         | 52        |
| 2.4.3      | 循環歩容からクロール歩容への遷移         | 55        |
| 2.4.4      | 循環歩容から循環歩容への遷移           | 57        |
| 2.5        | 胴体姿勢による移動速度への影響          | 59        |
| 2.6        | おわりに                     | 61        |
| <b>第3章</b> | <b>最適な胴体姿勢を有する全方位静歩行</b> | <b>63</b> |
| 3.1        | はじめに                     | 64        |
| 3.2        | 最適化問題                    | 66        |

|            |                                   |            |
|------------|-----------------------------------|------------|
| 3.2.1      | 制約なし非線形最適化                        | 66         |
| 3.2.2      | 問題の設定                             | 66         |
| 3.3        | 最適な胴体姿勢の導出                        | 69         |
| 3.3.1      | 移動方向指定のクロール歩容                     | 69         |
| 3.3.2      | 任意方向のクロール歩容                       | 71         |
| 3.3.3      | 循環歩容                              | 73         |
| 3.4        | 最適な胴体姿勢を有する歩容遷移                   | 74         |
| 3.4.1      | クロール歩容からクロール歩容への遷移                | 76         |
| 3.4.2      | クロール歩容から循環歩容への遷移                  | 78         |
| 3.4.3      | 循環歩容からクロール歩容への遷移                  | 80         |
| 3.4.4      | 循環歩容から循環歩容への遷移                    | 81         |
| 3.5        | おわりに                              | 82         |
| <b>第4章</b> | <b>重心高さを生かした最適な胴体姿勢を有する全方位静歩行</b> | <b>83</b>  |
| 4.1        | はじめに                              | 84         |
| 4.2        | 重心高さによる安定性と移動速度への影響               | 85         |
| 4.2.1      | 安定性評価指標                           | 85         |
| 4.2.2      | クロール歩容と循環歩容の安定性                   | 86         |
| 4.2.3      | 3脚支持期間の安定性                        | 87         |
| 4.3        | 最適化問題                             | 91         |
| 4.3.1      | 条件付き非線形最適化                        | 91         |
| 4.3.2      | 問題の設定                             | 91         |
| 4.4        | 重心高さを生かした最適な胴体姿勢の導出               | 94         |
| 4.4.1      | 移動方向指定のクロール歩容                     | 95         |
| 4.4.2      | 任意方向のクロール歩容                       | 96         |
| 4.4.3      | 循環歩容                              | 97         |
| 4.5        | 重心高さを生かした最適な胴体姿勢を有する歩容遷移          | 98         |
| 4.5.1      | クロール歩容からクロール歩容への遷移                | 99         |
| 4.5.2      | クロール歩容から循環歩容への遷移                  | 101        |
| 4.5.3      | 循環歩容からクロール歩容への遷移                  | 103        |
| 4.5.4      | 循環歩容から循環歩容への遷移                    | 104        |
| 4.6        | おわりに                              | 105        |
| <b>第5章</b> | <b>歩行実験</b>                       | <b>107</b> |
| 5.1        | はじめに                              | 108        |
| 5.2        | 実験機材とシミュレーションの設定について              | 109        |
| 5.3        | 傾斜面における全方位静歩行について                 | 112        |
| 5.3.1      | 胴体姿勢と重心高さを任意にさせた状態での歩容遷移          | 112        |
| 5.3.2      | 胴体姿勢による移動速度への影響                   | 119        |
| 5.3.3      | 重心高さによる安定性への影響                    | 123        |

---

|            |  |            |
|------------|--|------------|
| 5.4        | 最適な胴体姿勢による移動速度の向上について . . . . .                  | 125        |
| 5.4.1      | 移動方向指定のクロール歩容 . . . . .                          | 125        |
| 5.4.2      | 任意方向のクロール歩容 . . . . .                            | 126        |
| 5.4.3      | 循環歩容 . . . . .                                   | 128        |
| 5.5        | 最適な胴体姿勢を有する歩容遷移について . . . . .                    | 129        |
| 5.5.1      | クロール歩容からクロール歩容への遷移 . . . . .                     | 129        |
| 5.5.2      | クロール歩容から循環歩容への遷移 . . . . .                       | 131        |
| 5.5.3      | 循環歩容からクロール歩容への遷移 . . . . .                       | 133        |
| 5.5.4      | 循環歩容から循環歩容への遷移 . . . . .                         | 134        |
| 5.6        | 重心高さを生かした最適な胴体姿勢による安定性と移動速度の向上<br>について . . . . . | 135        |
| 5.6.1      | 移動方向指定のクロール歩容 . . . . .                          | 135        |
| 5.6.2      | 任意方向のクロール歩容 . . . . .                            | 137        |
| 5.6.3      | 循環歩容 . . . . .                                   | 138        |
| 5.7        | 重心高さを生かした最適な胴体姿勢を有する歩容遷移について . . .               | 139        |
| 5.8        | 斜面全方位静歩行の実機実験 . . . . .                          | 142        |
| 5.8.1      | 胴体姿勢と重心高さを任意に維持した状態での斜面全方位静<br>歩行の実機実験 . . . . . | 142        |
| 5.8.2      | 重心高さを生かした最適な胴体姿勢を有する全方位歩行の実<br>機実験 . . . . .     | 147        |
| 5.9        | おわりに . . . . .                                   | 152        |
| <b>第6章</b> | <b>結論と今後の課題</b>                                  | <b>153</b> |
| 6.1        | 結論 . . . . .                                     | 154        |
| 6.2        | 今後の課題 . . . . .                                  | 156        |
|            | 謝辞   | 157        |
|            | 参考文献   | 159        |
|            | 発表論文   | 165        |



# 目 次

|      |  |    |
|------|--|----|
| 1.1  | The robots A) TITAN-II, B) TITAN-III, C) TITAN-IV developed by Hirose Lab. Tokyo Institute of Technology . . . . .                   | 3  |
| 1.2  | The robot 「tekken」 developed by Electro-Communications Univ. Kimura Lab . . . . .  | 4  |
| 1.3  | The robot 「MrWallSpextIII」 developed by Sungkyunkwan Univ. of Korea . . . . .  | 4  |
| 1.4  | The robots 「Warp1」 developed by Royal Institute of Technology, KTH of Sweden . . . . .   | 4  |
| 1.5  | Intermittent crawl gait . . . . .  | 8  |
| 1.6  | An adaptive gait (an exented straight intermitter crawl gait) . . . .  | 8  |
| 1.7  | Crawl gait ( $\beta=0.75$ ) . . . . .  | 11 |
| 1.8  | Trot gait ( $\beta=0.5$ ) . . . . .  | 11 |
| 1.9  | Pace gait ( $\beta=0.5$ ) . . . . .  | 11 |
| 1.10 | Bound gait ( $\beta=0.5$ ) . . . . .   | 12 |
| 1.11 | Transverse-gallop ( cat ) . . . . .  | 12 |
| 1.12 | Transverse-gallop ( horse ) . . . . .  | 12 |
| 1.13 | Foot trajectories, model dimensions and parameters of standard circular gair . . . . .   | 13 |
| 1.14 | Rotation gait ( $\beta=0.75$ ) . . . . .   | 13 |
| 1.15 | Static stability margin $S_M$ . . . . .  | 14 |
| 1.16 | Normalized energy stability margin $S_{NE}$ . . . . .  | 15 |
| 1.17 | Control system of the walking robot . . . . .  | 17 |
| 1.18 | A quadruped robot: TITAN-VIII . . . . .  | 20 |
| 1.19 | Quadruped robot model . . . . .  | 20 |
| 1.20 | Link model of quadruped robot . . . . .  | 20 |
| 1.21 | Gait planing structure . . . . .   | 23 |
| 1.22 | Resolved motion raito control . . . . .  | 25 |
| 2.1  | Coordinates (Body coordinate $\Sigma_\alpha$ , Horizontal coordinate $\Sigma_\beta$ and Slope coordinate $\Sigma_\gamma$ ) . . . . . | 31 |
| 2.2  | Robot model, leg movable area $A_i$ and region $R_i$ . . . . .   | 33 |
| 2.3  | Common foot position for each walking gait on a slope . . . . .  | 34 |

|      |  |    |
|------|--|----|
| 2.4  | Calculation of common foot position (CFP) . . . . .  | 35 |
| 2.5  | Algorithm of common foot position (CFP) . . . . .  | 36 |
| 2.6  | Foot trajectories, foot common position and parameters for standard circular gait . . . . .  | 40 |
| 2.7  | Type of the crawl gait . . . . .   | 42 |
| 2.8  | Type of the rotation gait . . . . .  | 42 |
| 2.9  | Gait selection by center of curvature . . . . .  | 42 |
| 2.10 | Ellipse course on slope . . . . .  | 43 |
| 2.11 | Reachable angles of a leg around curvature center . . . . .  | 44 |
| 2.12 | Flow chart of gait-transition all patterns . . . . .   | 48 |
| 2.13 | Flow chart of gait-transition from crawl gait to crawl gait (case 1, case 2) . . . . .   | 49 |
| 2.14 | Gait-transition crawl gait to crawl gait (case 1, case 2) . . . . .  | 50 |
| 2.15 | Flow chart of gait-transition from crawl gait to rotation gait (case 1, case 2) . . . . .  | 52 |
| 2.16 | Gait-transition from crawl gait to rotation gait (case 1, case 2) . . . . .  | 53 |
| 2.17 | Flow chart of gait-transition from rotation gait to crawl gait . . . . .   | 56 |
| 2.18 | Gait-transition from rotation gait to crawl gait . . . . .   | 56 |
| 2.19 | Flow chart of gait-transition from rotation gait to rotation gait . . . . .  | 57 |
| 2.20 | Gait-transition from rotation gait to rotation gait . . . . .  | 57 |
| 2.21 | The relation of a trade-off between leg movable region and body posture . . . . .  | 59 |
| 3.1  | Algorithm of gradient method for optimal body posture . . . . .  | 67 |
| 3.2  | The optimal body posture of the specified moving direction on the slope . . . . .  | 70 |
| 3.3  | The optimal body posture that gives the fastest moving speed for specified moving direction of crawl gait . . . . .                            | 70 |
| 3.4  | The optimal body posture of the arbitrary moving direction on the slope . . . . .  | 71 |
| 3.5  | The optimal body posture that gives the fastest moving speed for arbitrary moving direction of crawl gait $\psi_{bY}=0[\text{deg}]$ . . . . .  | 71 |
| 3.6  | The optimal body posture that gives the fastest moving speed for arbitrary moving direction of crawl gait $\psi_{bY}=90[\text{deg}]$ . . . . . | 72 |
| 3.7  | The optimal body posture of the rotation gait on the slope . . . . .   | 73 |
| 3.8  | Gait-transition case 1 from crawl gait to crawl gait with optimal body posture . . . . .   | 77 |
| 3.9  | Gait-transition case 2 from crawl gait to crawl gait with optimal body posture . . . . .   | 77 |

|      |  |     |
|------|--|-----|
| 3.10 | Gait-transition case 1 from crawl gait to rotation gait with optimal body posture . . . . .  | 79  |
| 3.11 | Gait-transition case 2 from crawl gait to rotation gait with optimal body posture . . . . .  | 79  |
| 3.12 | Gait-transition from rotation gait to crawl gait with optimal body posture . . . . .   | 80  |
| 3.13 | Gait-transition from rotation gait to rotation gait with optimal body posture . . . . .  | 81  |
| 4.1  | Influence on stability margin $S_M$ by changing the height of COG . .  | 85  |
| 4.2  | Influence on NE stability margin $S_{NE}$ by changing the height of COG  | 86  |
| 4.3  | Three legs supporting period of X-crawl gait . . . . .   | 88  |
| 4.4  | Three legs supporting period of Y-crawl gait . . . . .   | 88  |
| 4.5  | Three legs supporting period of rotation gait . . . . .  | 89  |
| 4.6  | The stability margin $S_M$ and normalized energy stability margin $S_{NE}$ during a walk . . . . .                                 | 90  |
| 4.7  | COG-correspondent optimal body posture (COBP) of the specified moving direction . . . . .  | 95  |
| 4.8  | COBP of the arbitrary moving direction . . . . .   | 96  |
| 4.9  | COBP of the rotation gait . . . . .  | 97  |
| 4.10 | Gait-transition case 1 from crawl gait to crawl gait with COBP . .   | 99  |
| 4.11 | Gait-transition case 2 from crawl gait to crawl gait with COBP . .   | 100 |
| 4.12 | Gait-transition case 1 from crawl gait to rotation gait with COBP .  | 101 |
| 4.13 | Gait-transition case 2 from crawl gait to rotation gait with COBP .  | 102 |
| 4.14 | Gait-transition from rotation gait to crawl gait with COBP . . . . .   | 103 |
| 4.15 | Gait-transition from rotation gait to rotation gait with COBP . . .  | 104 |
| 5.1  | The GUI operation panel screen by OpenGL . . . . .   | 111 |
| 5.2  | Real roboto TITAN-VIII . . . . .   | 111 |
| 5.3  | Walking image for gait-transition from X-crawl to Y-crawl (case 1)   | 113 |
| 5.4  | Walking path of COG and corresponding stability margin for the gait-transition from crawl gait to crawl gait (case 1) . . . . .    | 113 |
| 5.5  | Walking image for gait-transition from X-crawl to Y-crawl (case 2)   | 114 |
| 5.6  | Walking path of COG and corresponding stability margin for the gait-transition from crawl gait to crawl gait (case 2) . . . . .    | 114 |
| 5.7  | Walking image for gait-transition from X-crawl to rotation (case 1)  | 115 |
| 5.8  | Walking path of COG and corresponding stability margin for the gait-transition from crawl gait to rotation gait (case 1) . . . . . | 115 |
| 5.9  | Walking image for gait-transition from X-crawl to rotation (case 2)  | 116 |

|      |  |     |
|------|--|-----|
| 5.10 | Walking path of COG and corresponding stability margin for the gait-transition from crawl gait to rotation gait (case 2) . . . . .                                   | 116 |
| 5.11 | Walking image for gait-transition from rotation to X-crawl . . . . .   | 117 |
| 5.12 | Walking path of COG and corresponding stability margin for the gait-transition from rotation gait to crawl gait . . . . .  | 117 |
| 5.13 | Walking image for gait-transition from rotation to rotation . . . . .  | 118 |
| 5.14 | Walking path of COG and corresponding stability margin for the gait-transition from rotation gait to rotation gait . . . . .   | 118 |
| 5.15 | Changing walking speed by rotated body state on slope direction $\psi_{bY}=0.0[\text{deg}]$ . . . . .  | 120 |
| 5.16 | Changing walking speed by rotated body state on slope direction $\psi_{bY}=90.0[\text{deg}]$ . . . . .   | 121 |
| 5.17 | Influence on $S_{NE}$ by changing the height of COG . . . . .  | 123 |
| 5.18 | Compare $S_{NE1}$ and $S_{NE2}$ . . . . .  | 123 |
| 5.19 | Motion speed in crawl gait while the specified moving direction is set as a $30[\text{deg}]$ angle of the $X_\alpha$ -axis (Fig.3.2) . . . . .                       | 126 |
| 5.20 | Verification of the improvement in moving speed (X,Y-crawl gait for arbitrary moving direction) . . . . .  | 126 |
| 5.21 | Verification of the improvement in moving speed (rotation gait) . . . . .  | 128 |
| 5.22 | Walking path of COG, corresponding stability margin, legs state and optimal body posture for the gait-transition from crawl gait to crawl gait (case 1) . . . . .    | 129 |
| 5.23 | Walking path of COG, corresponding stability margin, legs state and optimal body posture for the gait-transition from crawl gait to crawl gait (case 2) . . . . .    | 130 |
| 5.24 | Walking path of COG, corresponding stability margin, legs state and optimal body posture for the gait-transition from crawl gait to rotation gait (case 1) . . . . . | 131 |
| 5.25 | Walking path of COG, corresponding stability margin, legs state and optimal body posture for the gait-transition from crawl gait to rotation gait (case 2) . . . . . | 132 |
| 5.26 | Walking path of COG, corresponding stability margin, legs state and optimal body posture for the gait-transition from rotation gait to crawl gait . . . . .          | 133 |
| 5.27 | Walking path of COG, corresponding stability margin, legs state and optimal body posture for the gait-transition from rotation gait to rotation gait . . . . .       | 134 |
| 5.28 | Moving speed and $S_{NEAvg}$ in crawl gait while the specified moving direction is set as a $30[\text{deg}]$ angle of the $X_\alpha$ -axis (Fig.4.7(c)(d)) . . . . . | 136 |

---

|      |   |     |
|------|---|-----|
| 5.29 | Verification of the improvement in moving speed and $S_{NEAvg}$ (X,Y-Crawl gait for arbitrary moving direction) . . . . .   | 137 |
| 5.30 | Verification of the improvement in moving speed and $S_{NEAvg}$ (Rotation gait) . . . . .   | 139 |
| 5.31 | Simulation result of all gait-transition patterns. Walking path of COG, corresponding stability margin and legs state, optimal body posture and optimal height of COG . . . . . | 140 |
| 5.32 | Walking path of COG, corresponding stability margin and legs state for the gait-transition from crawl gait to crawl gait (case 1) . . . . .                                     | 143 |
| 5.33 | Quadruped robot motion for the gait-transition from crawl gait to crawl gait (case 1) on a slope of inclination angle 5.0 . . . . .   | 144 |
| 5.34 | Walking path of COG, corresponding stability margin and legs state for the gait-transition from crawl gait to crawl gait (Case 2) . . . . .                                     | 145 |
| 5.35 | Side view of quadruped robot motion for the gait-transition from crawl gait to crawl gait (case 1) on a slope of inclination angle 10.0 . . . . .                               | 146 |
| 5.36 | Simulation result of the gait-transition from crawl gait to crawl gait (case 1) on a slope of inclination angle 10.0 by changing the height of COG . . . . .                    | 148 |
| 5.37 | Quadruped robot motion for the gait-transition from crawl gait to crawl gait (case 1) on a slope of inclination angle 10.0 by changing the height of COG . . . . .              | 149 |
| 5.38 | Simulation result of the gait-transition from crawl gait to crawl gait (case 1) with COBP on a slope of inclination angle 10.0 . . . . .  | 150 |
| 5.39 | Side view of quadruped robot motion for the gait-transition from crawl gait to crawl gait (case 1) with COBP on a slope of inclination angle 10.0 . . . . .                     | 151 |



# 表 目 次

|     |  |     |
|-----|--|-----|
| 1.1 | Movable region of joint . . . . .  | 19  |
| 2.1 | Partition coefficient for each walking pattern . . . . .   | 45  |
| 3.1 | Robot model specifications and parameters for optimal body posture   | 69  |
| 3.2 | Optimal body posture of special point A,B . . . . .  | 73  |
| 4.1 | Changing of supporting leg diagonal lines $D_i$ . . . . .  | 87  |
| 4.2 | The experience value of $S_{NEAvg}$ by real robot experiment ( $H_{cog} =$<br>$0.243[m]$ ) . . . . .                               | 89  |
| 4.3 | Specifications of robot model and parameters for COG-Correspondent<br>optimal body postures . . . . .                              | 94  |
| 4.4 | COBP of special point A,B . . . . .  | 97  |
| 5.1 | Spec of Quadruped robot . . . . .  | 109 |
| 5.2 | Parameter of Simulation . . . . .  | 109 |
| 5.3 | Maximum moving speed, corresponding body posture and limiting<br>angle to walk on slope . . . . .                                  | 119 |
| 5.4 | Improvement in the moving speed by the optimal body posture<br>(specified moving direction, $\psi_{bY}=60[\text{deg}]$ ) . . . . . | 125 |
| 5.5 | Improvement in the moving speed by the optimal body posture<br>(arbitrary moving direction) . . . . .                              | 127 |
| 5.6 | Improvement in the moving speed by the COBP (specified moving<br>direction, $\psi_{bY}=60[\text{deg}]$ ) . . . . .                 | 135 |
| 5.7 | Improvement in the moving speed by COBP (arbitrary moving di-<br>rection) . . . . .  | 138 |

# 第1章 序論

## 目次

---

|       |                 |    |
|-------|-----------------|----|
| 1.1   | 脚移動ロボット         | 2  |
| 1.2   | 従来の研究           | 7  |
| 1.2.1 | 動物の歩行パターン       | 11 |
| 1.2.2 | 脚移動ロボットの安定性評価基準 | 14 |
| 1.2.3 | 4脚ロボットの制御       | 17 |
| 1.2.4 | 4脚ロボットの全方位静歩行   | 19 |
| 1.3   | 本研究の目的          | 27 |
| 1.4   | 本論文の構成          | 28 |

---

## 1.1 脚移動ロボット

人間やかもしかの山岳における移動能力から考えると，その制御の難しさにもかかわらず脚式移動ロボットの移動手段として最も魅力的な方法の1つである．脚移動ロボットは古くから研究されており，1脚のような単脚ロボットから8脚のような多脚ロボットなど幅広く研究されている．

脚移動ロボットの特徴としては，以下に示すような三つの機能がある．

- 1) 凹凸の激しい不整地，また脆弱な環境においても脚支持点を適当に選択することでより滑らかに移動できる；
- 2) 脚の接地点は離散的であるため，階段の昇降，地面の障害物の非接触な跨ぎ越えなど，車輪やクローラでは走行できないような不整地においても静的安定歩行によって低速で安定な走行を容易に実現できる；
- 3) 脚の自由度を利用することで積載したマニピュレータなどの作業を補助できる；
- 4) 動的安定歩行による揺動的ではあるが高速な歩行を行うことができる．

このような機能があるため，車輪やクローラなどの移動装置では効率的な推進が困難な不規則かつ凹凸の激しい荒地で，近未来の作業装置搬送機械への発展やマニピュレータの移動搬送車（moving platform）への応用を考えた場合，高い実用性を発揮するものと考えられる．昨今では6脚，4脚のみではなく2脚步行ロボットも盛んに研究され，本田技研のASIMOに代表されるヒューマノイドロボットや，SONYのAIBOに代表されるペットロボットなどが登場しており，脚移動ロボットは身近になりつつある．

脚移動ロボットの脚の本数に関しては，次の理由により4脚が最適であると考えられている．

- 1) 移動環境の適応
- 2) フレキシブル（flexible）な運動の実現
- 3) 自重とペイロード（payload：有効荷重）
- 4) 静的安定性の維持
- 5) エネルギー効率の向上

そのため，これまでに多くの4脚移動ロボットは開発され，研究が進められている．

まず，Fig.1.1に示すように，東京工業大学広瀬研究室で開発したTITANシリーズがある．TITAN-IIIは脚長1.2m，質量80kg，足先には写真のような超弾性特性

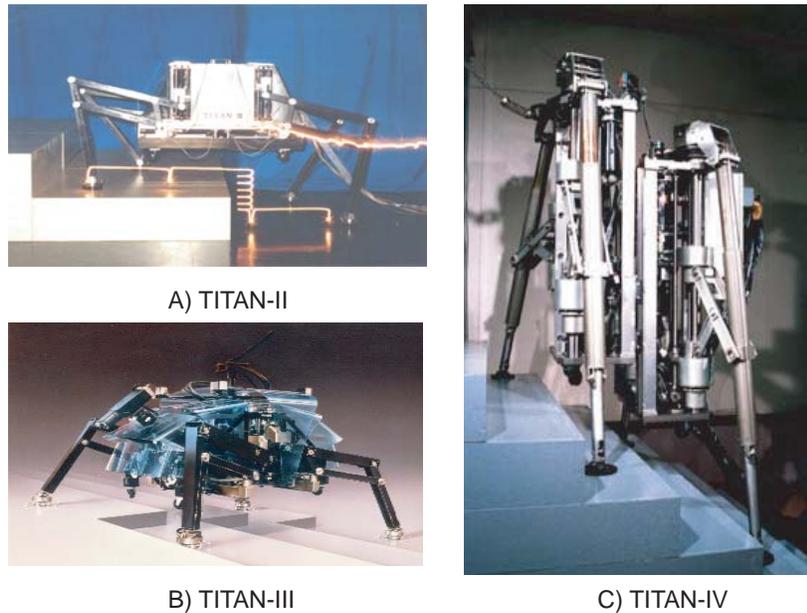


Figure 1.1: The robots A) TITAN-II, B) TITAN-III, C) TITAN-IV developed by Hirose Lab. Tokyo Institute of Technology

を有する形状記憶合金性のワイヤからなるウイスカセンサとその信号処理系が装備され、接地状態を自動的に判断している。また姿勢センサも装備され、これらのセンサ情報を総合的に判断し対地適応的な静歩行を実現するための PEGASUS (Perspective Gait Supervisory System) と呼ぶ知能的歩容制御システムが搭載されている。TITAN-IIIは階段を足先の触覚で探りながら歩くことができる。Fig.1.1(C)に示すように、TITAN-IVは脚長 1.2m、全質量 160kg、静止状態からクロール歩容、そして対角脚 2 脚で交互に歩くトロット歩容に自動的に歩容を切り替え最大 40cm/sec までの動的歩行までを行う静動融合歩容も実現した。TITAN-IVは高さ 1.5m、左右幅 1m、前後 1.5m、全質量 190kg。対角 2 脚を支持脚とする動的なトロット歩行により、平地や勾配 40 度までの階段を動的に歩行することができる 4 足歩行機械である。本論文ではそれらの制御方法について第 1.3 節にて詳しく紹介する。

そして、電気通信大学木村研は Fig.1.2 に示すような 4 脚ロボット「鉄犬」を開発した [48,49]。その「鉄犬」において、神経振動子を相互接続した「神経振動子ネットワーク」を中心とした神経系モデルを用いて、不整地における動歩行と平地での走行を実現した [50]。

また、韓国 Sungkyunkwan 大学の Kim Hyungseok らは Fig.1.3 に示すような 4 脚ロボット「MrWallSpextIII」を開発した [46]。その「MrWallSpextIII」において、水平面、傾斜面、異なる傾斜角を有する傾斜面などの環境での走行を実現した [47]。

さらに、スウェーデンの研究機関は Fig.1.4 に示すような 4 脚ロボット「Warp1」

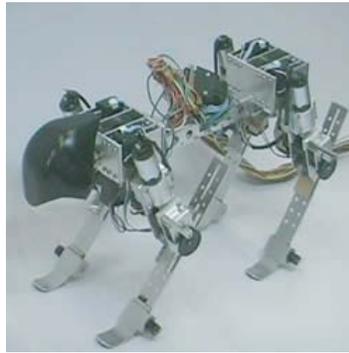


Figure 1.2: The robot 「tekken」 developed by Electro-Communications Univ. Kimura Lab

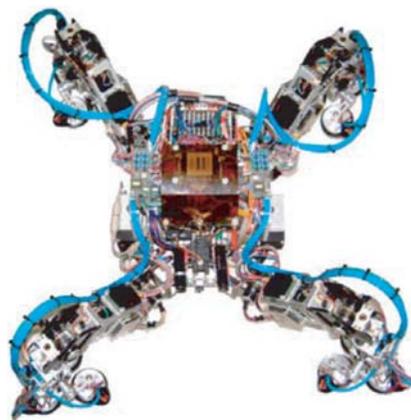
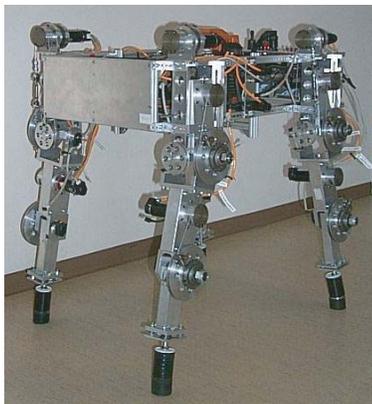
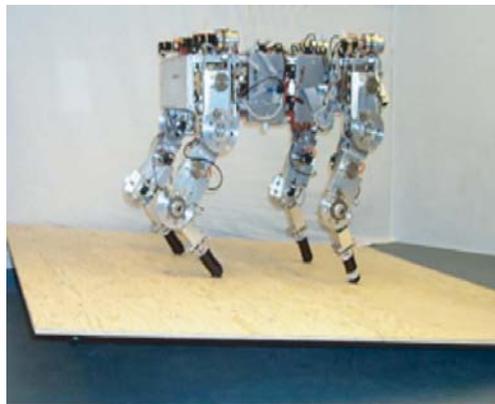


Figure 1.3: The robot 「MrWallSpextIII」 developed by Sungkyunkwan Univ. of Korea



A) The robot Warp1



B) Warp1 on a balance board

Figure 1.4: The robots 「Warp1」 developed by Royal Institute of Technology, KTH of Sweden

を開発し、いくつかの制御手法を提案した。提案した手法を用いることで動いているバランス・ボード上において、ロボットの胴体姿勢は水平のまま維持することができる [51]。

以上に示した4脚ロボットのほか、ロボットの上にアームを乗せて作業する [39]、ロボットの両側に車輪を付けて走行する脚車輪型ロボットの開発 [40] などの研究が行われている。

4脚ロボットはその高い対地適応性と全方位移動性を活かすことで、複雑な環境であらゆる方向へ移動することができ、災害地での人命救助や地雷撤去、建設現場での作業などに活躍することが期待されている。しかし、6脚歩行ロボットの場合は常に3本以上の脚を接地させることによって、4脚ロボットの場合と比較して大きな安定余裕が確保できるため、問題が容易になっている。これに対して4脚ロボットが静歩行を行う場合は、3脚支持状態での重心移動中に安定性を失う可能性や、4脚支持状態で可動限界に達した脚があっても、即時にその脚を遊脚化できるとは限らないため、問題が複雑になっている。そのため、近年、不整地に対する走破性から、4脚ロボットに関する研究が精力的に進められているが、実用化にはまだ至っていない。

これまでに、脚移動ロボットの実用化に関する研究は多くなされていて、ロボットの機構の開発とロボットの制御の研究に大きく分かれている。ロボットの制御にはリアルタイム制御、センサを用いて外部環境の検知、経路計画、ナビゲーション、歩容計画などに大別されています。

そこで、4脚歩行機械が有する高い対地適応性、移動性能を発揮してゆくためには、4脚歩行機械による多彩で効率的な歩容の生成法のみではなく、その定常的な歩容パターンを融合することによって、滑らかな歩行の実現手法をも明らかにしてゆくことが不可欠である。また、歩行機械の適応的でスムーズな歩行を実現するためにはより多面的な検討が必要となる。例えば、歩行機械は単に連続的な歩行動作を行うだけではなく、停止して作業を行うことがかならず必要となるが、この歩行終了時には脚を望みの、安定で作業しやすい4脚支持位置に運ぶ動作が行えなければならない。また、歩行中でも基本となるクロール歩容、循環歩容などの基準歩容を変更する際には歩容が切り替わる遷移的な区間が生じる。従来の歩容決定手法は基準となる歩容が連続することを前提にし、予測的な歩容決定を行うものであるため、連続的な歩容は不可能になる場合も生じている。こうした状況では、切り替わる前後の歩容を結合する特別の歩容決定手法がかならず必要となる。

そして、上記の考察に基づき、本研究はその歩容計画、静的歩行制御に注目し、特に4脚ロボットの全方位静歩行の研究を行い、実際に社会空間や自然環境下での活動が可能な4脚ロボットの制御方法の開発を目指している。4脚ロボットが全方位静歩行を行うことで、障害物が多く存在する環境においても移動が可能であり、重い貨物を運搬する際にロボットの不連続運動で生じる慣性力による不安定化の問題も解消できる。また、軌道計画・追従型の制御法によって歩行制御を行うため、安定性が高めつつ、再現性に優れている利点を有している。本研究では

その初期段階として，その4脚ロボットの歩容計画手法に注目し，積極的に重心高さと胴体姿勢を変更することによって，傾斜面における4脚ロボットの安定性の向上，移動速度の最大化及び全方位静歩行の実現手法に関する研究を行う．将来的に，その制御手法を4脚ロボットに適用することで，災害地での人命救助や地雷撤去，建設現場での作業などに近未来の作業搬送機械への発展やロボットの上にアームを乗せて作業するマニピュレータの移動搬送車への応用を考えた場合，高い実用性を発揮するものと考えられる．

## 1.2 従来の研究

4脚ロボットは静歩行によってゆっくりとしているが滑らかな移動，動歩行によって振動的であるがより高速な移動を行う機能を有する．そのため，4脚ロボットの歩容制御法については静歩行と動歩行に分類され，それらに関する研究が従来から多くなされてきた [5–10]．動歩行については支持脚切り換え現象を考慮した4足歩行ロボットの動的制御 [35] や，4足歩行機械の間欠トロット歩容–全方向歩行の動的制御 [48] や，CPGを用いた不整地に対応する4脚ロボットの動歩行 [49, 50] などが実現されている．

静歩行の研究については，まずクロール歩容の進行方向を一般化した基準側行歩容 [6, 21] と任意の旋回中心回りにおける旋回と旋回角速度の最大化を図る基準旋回歩容 [5] が報告された．これらの研究は定常的な歩行パターンについて研究されたものであり，歩行中にロボットの歩行方向が変化された時，歩行パターンの切り替えが必要であった．そのため，静歩行における歩容切り替えの歩行パターンとしては，基準歩容と基準歩容の繋ぎとなる踏み替え歩容 [7] や，可動限界到達時の踏み替えルールに基づく操縦型歩行制御 [32] や，クロール歩容に胴体重心の左右揺動を付加しながら前進，後退，左右旋回，左右その場旋回の歩行パターン間を遷移するもの [41] などが提案されている．これらの研究では，「任意の4脚支持姿勢から任意の4脚支持姿勢」に踏みかえることを実現している．これは踏み替えを始める前に必ず一度歩行を停止させる必要があり，歩行の流れの中で連続的に歩容遷移が実現されていない．参考文献 [41] では，静歩行である程度連続的な歩容遷移と全方位歩行を実現している．これはあくまで前進後退，左右の旋回，その場旋回を実現しているのみであり，ある歩容からある歩容へ遷移する際に別の歩容を間にはさんで遷移することもあるため，必ずしも連続的な歩容遷移を実現したとは言えない．

また，Fig.1.5 に示すような歩行時の安定性を最大化する間欠クロール歩容 [14]，Fig.1.6 に示すような直線間欠クロール歩容を拡張した適応歩容 [42] が提案され，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，4脚支持期間の設定などによって，移動速度が明らかに低下している．ロボットの胴体姿勢と重心高さを積極的に変更することによって，ロボットが傾斜面などの環境において歩行中の移動速度の向上と安定性の向上にも有効に利用されていない．

一方，複雑な環境での運搬作業などの場合，移動速度より安定性が重視されているため，本研究室では4脚ロボットが最も安定に歩行できる静歩行に議論を限定し，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脚ロボットの全方位静歩行 [23] を実現している．この全方位静歩行は任意旋回中心回りのクロール歩容と循環歩容を有機的に組み合わせることにより実現される全方位への連続的な静歩行である．ある定められた方向への連続的な歩行のみでなく，歩行方向を変化するときの連続的な歩行でもあることに特徴がある．4脚ロボットが全方位静歩行を行うことで，障害物が多く存在する環境においても移動が可能であり，重い貨物を運搬する際にロボットの不連続運動で生じる慣性力による不安

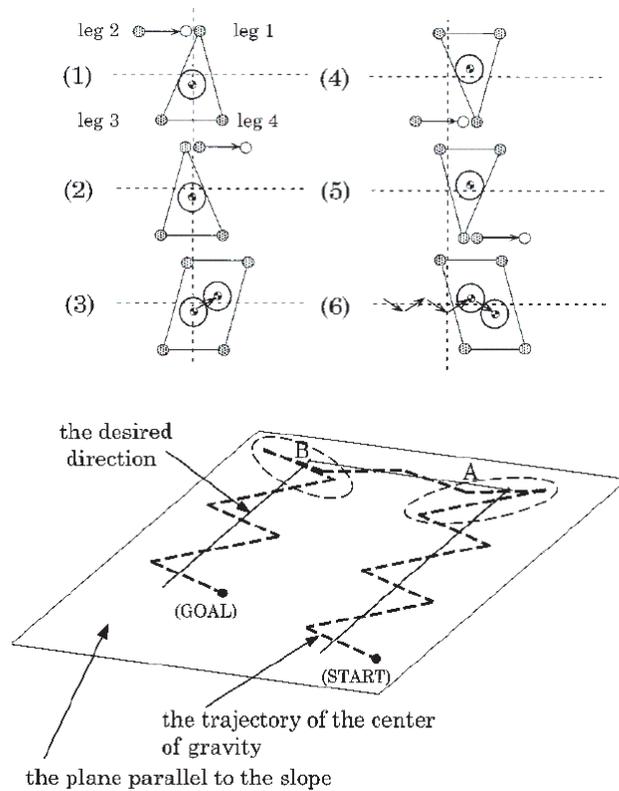


Figure 1.5: Intermittent crawl gait

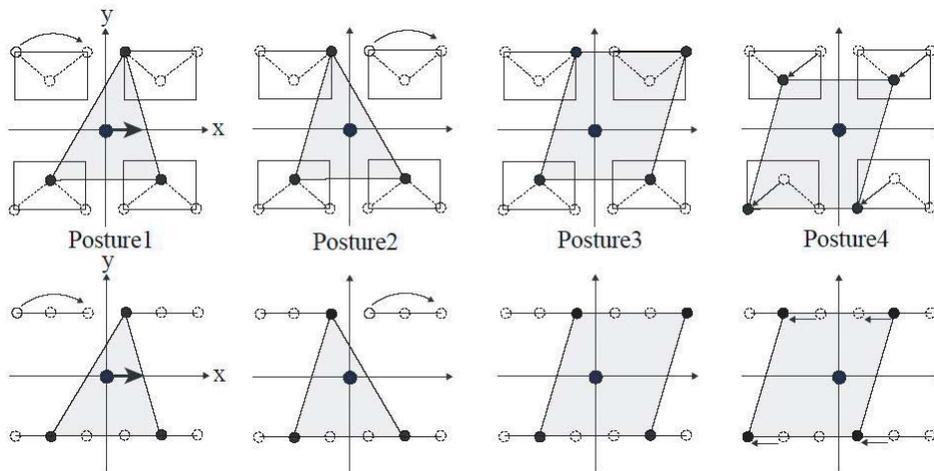


Figure 1.6: An adaptive gait (an exented straight intermitter crawl gait)

定化の問題も解消できる．この全方位静歩行を実現する手法では，遷移前後の歩容で共通の脚配置（脚基準位置）が存在するように設計することによって，少ない歩数で歩容遷移を完了することができ，移動効率を向上できることが確認されて

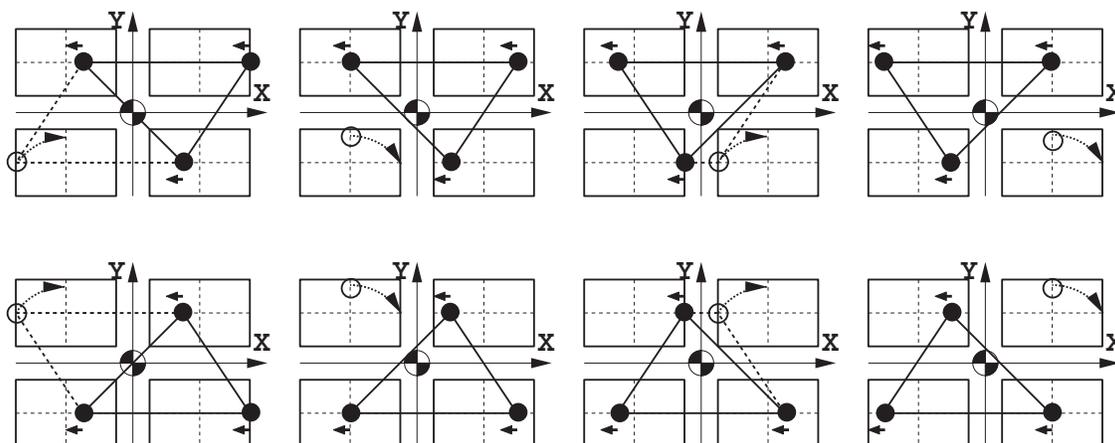
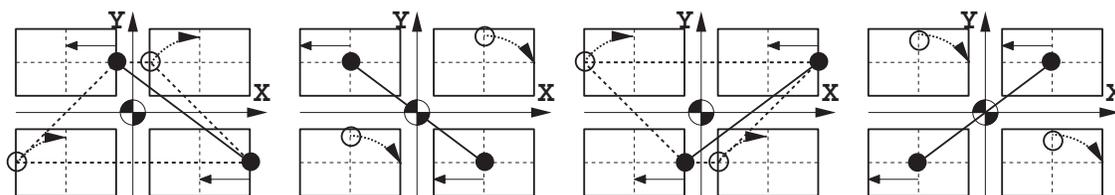
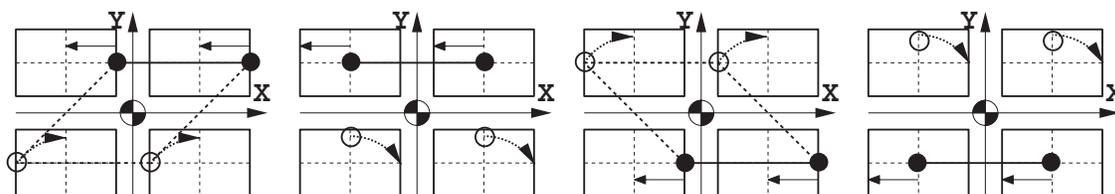
いる．しかし，この全方位静歩行手法では水平面に限定されているため，4脚ロボットの高い対地適応性を有効に生かしていなかった．さらに，これらの研究ではロボットの胴体姿勢，重心から接地面までの垂直距離（重心高さ）が固定されたままで，ロボットの胴体姿勢と重心高さを積極的に変更することによって，ロボットが傾斜面などの環境において歩行中の移動速度の向上と安定性の向上にも有効に利用されていない．従来の4脚ロボットの胴体姿勢と重心高さを扱う手法としては，姿勢変更を考慮した軌道追従歩容 [44]，頭上障害物を潜り抜けるために重心高さの変更 [45] が提案されているものの，積極的に重心高さと胴体姿勢を変更することによる安定性の向上，移動速度の最大化及び全方位静歩行の実現を統合的に議論する研究が行われていなかった．

本節ではまず，身近な動物の定常的な歩行（走行）パターンについて述べる．次に，脚移動ロボットの安定性評価基準について述べる．そして，1つの例として4脚ロボットの制御法について述べる．最後に，水平面における全方位静歩行の実現手法について述べる．

ここで、4脚ロボットの研究において一般的に使用される用語、基本概念を整理する。

- 静歩行 (Static walk): ロボットの歩行の速度を低くしたと想定した場合でも静的安定が維持され、計画通りの運動が持続できる歩行であり、ロボットの重心から水平面への投影点が、支持脚多角形の内部を通過する歩行である。
- 動歩行 (Dynamic walk): 歩行中に静的安定性が保持されない時期が存在する歩行である。
- 歩容 (Gait): 脚の移動順序やそのタイミングなどについての歩くパターン。
- 支持脚 (Supporting leg): 脚が接地している状態のこと
- 遊脚 (Swinging leg): 脚が空中にある状態のこと
- 支持脚多角形 (Supporting leg polygon): 支持脚の着地点が構成する多角形
- デューティ比 (Duty factor  $\beta$ ): 脚の1周期中に接地している時間の割合 (接地率)
- 側行歩容 (Crab walk) 胴体の向きと推進方向が一致していない歩容
- 循環歩容 (Circular gait) 隣あった脚が順々に遊脚する歩容
- 歩容遷移 (Gait transition) ある歩容から別の歩容に脚位置を変化させる移動のこと
- 対角三角切替え点 (Diagonal triangle exchange point DTE 点): クロール歩容において支持脚三角形が切り替わる脚位置のこと
- その場の旋回 (Turn in place): 重心回りにその場の旋回を行う。並行速度は0
- 臨界側行角 (Crab angle  $\alpha_c$ ): X方向の側行歩容からY方向の側行に切り換わるべき臨界角

## 1.2.1 動物の歩行パターン

Figure 1.7: Crawl gait ( $\beta=0.75$ )Figure 1.8: Trot gait ( $\beta=0.5$ )Figure 1.9: Pace gait ( $\beta=0.5$ )

4脚ロボットの研究は「馬」「ネコ」などの動物を手本とすることにした。人間との付き合いが長く、運動特性の測定が容易であると考えたからである。その動物の定常的な歩行（走行）パターンを観察することから始まり [1-3], Fig.1.7 ~ Fig.1.12 にあるような、クローल、トロット、ペース、ギャロップといった歩行（走行）パターンを4脚ロボットで実現するという試みがなされた。

まず、クロール歩容について説明する。静力学的に安定で扱いやすいクロール歩容を用いた事例は多く、これまでに様々な研究がなされてきた。クロール歩容 (Crawl Gait) は低速度歩行する4足動物でおもに使われる。すべての時間にわたって、必ず3本以上の脚が接地し、しかも4足で支持する期間もあり、静的安定性が最大となる歩行である。その具体例を Fig.1.7 に示す。脚先が接地する場合には、

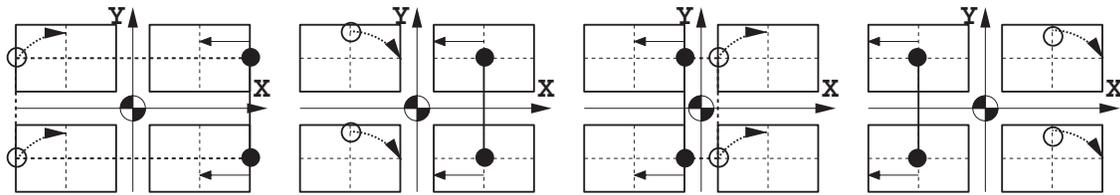
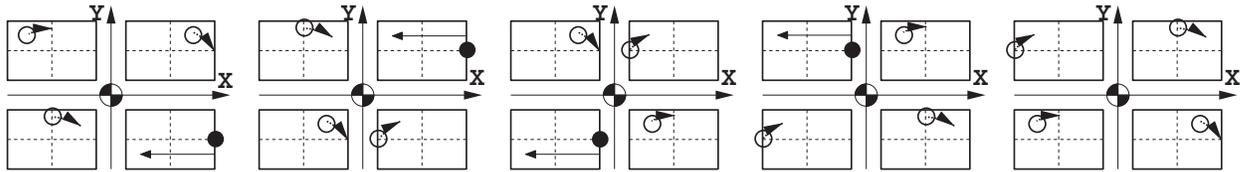
Figure 1.10: Bound gait ( $\beta=0.5$ )

Figure 1.11: Transverse-gallop (cat)

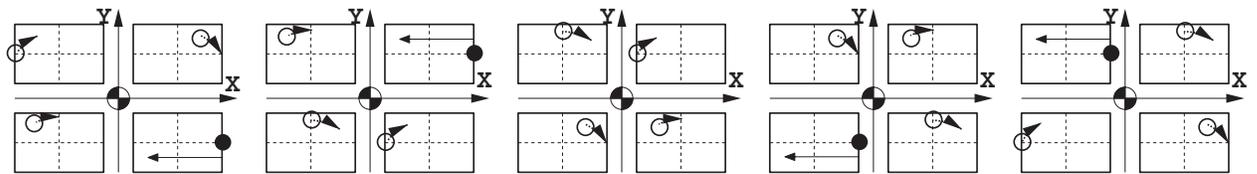


Figure 1.12: Transverse-gallop (horse)

デューティ比  $\beta$  によって比較すれば,  $1 > \beta \geq 0.75$  では静歩行,  $0.75 > \beta > 0.5$  では動歩行となる. デューティ比  $\beta$  を 0.75 にとると静歩行の中では歩行速度を最も大きくとることができる. デューティ比と歩行速度の関係は, 遊脚の上下運動の時間を無視すると次の式で表すことができる.

$$v = \frac{1 - \beta}{\beta} v_{max} \quad (1.1)$$

ここで,  $v$  は歩行速度,  $v_{max}$  は脚振り速さの最大値を表している. この式から, 歩行速度はデューティ比と反比例するため, 歩行速度を上げるにはデューティ比を下げればよいことが分かる. しかし, 静的安定には最少 3 本の支持脚が必要であるため, 静歩行におけるデューティ比の最小値は 0.75 であり, 静歩行において歩行速度を最大にするデューティ比は 0.75 である. このクローリング歩容を 4 脚ロボットに歩行に応用した研究は多くなされている. 例としては, 基準側行歩容 [6], 間歇クローリング歩容 [14], 直線クローリング間歇歩容 [42] などが挙げられる.

また, 4 脚ロボットについて, 任意位置の旋回中心が与えられるとき,  $X, Y, \theta$  のどの歩容を選択し, どのように脚を駆動すればよいのかについて研究が行われている. 評価関数として「歩行体重心の旋回周速度が最大値  $V_g$  をとる条件」と「単位サイクル歩行中の重心旋回角度  $\theta$  を最大化する条件」の 2 つにし, 非線形計画法で最適な旋回歩容が誘導されている. 旋回歩容は, Fig.1.13 に示すように任意

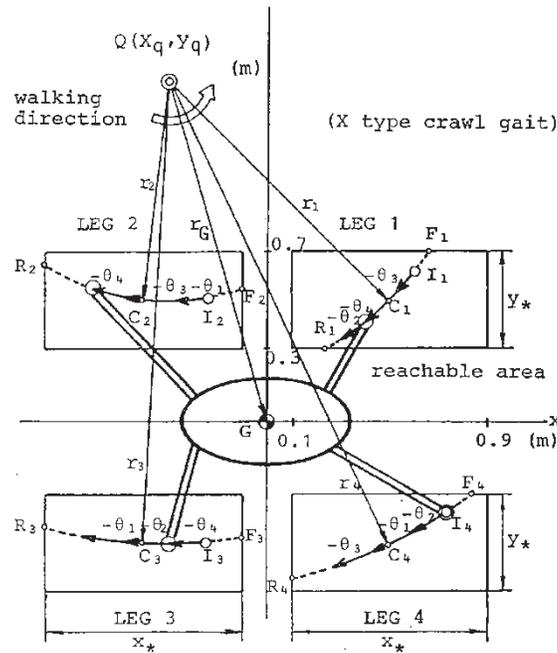


Figure 1.13: Foot trajectories, model dimensions and parameters of standard circular gait

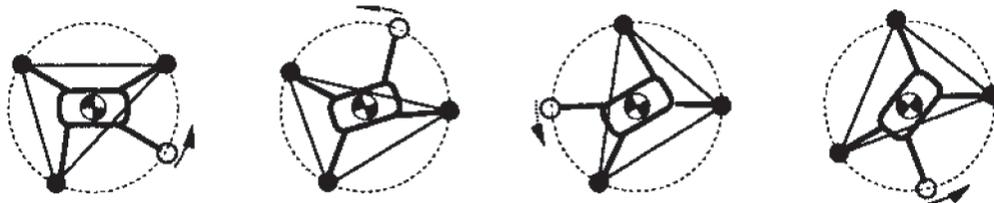


Figure 1.14: Rotation gait ( $\beta=0.75$ )

の旋回中心  $Q$  の回りに胴体重心が定常的な旋回歩行を行う歩容である。なお、その旋回中心が原点になる場合、その場の旋回的歩行を行う最も安定性と効率が高い循環歩容である。また、旋回中心が無窮遠にある場合の旋回歩容は側行歩容に一致する。水平面において旋回中心が重心投影点となる場合、その場の旋回となり、このような循環歩容を Fig.1.14 に示す。最も安定的な歩行であることが分かる。

## 1.2.2 脚移動ロボットの安定性評価基準

脚移動は車輪やクローラとは異なり，接地面が次々と変化するため常に胴体が転倒しないよう安定性の低下に注意する必要があるため，脚移動ロボットの安定性に対する研究も従来からなされている．この脚移動ロボットの安定性評価基準には静力学的な安定性評価基準，動力学的な安定性評価基準，力学的エネルギーによる安定性評価基準の3つに分けられる．これらの主な評価基準には以下のようなものがある．

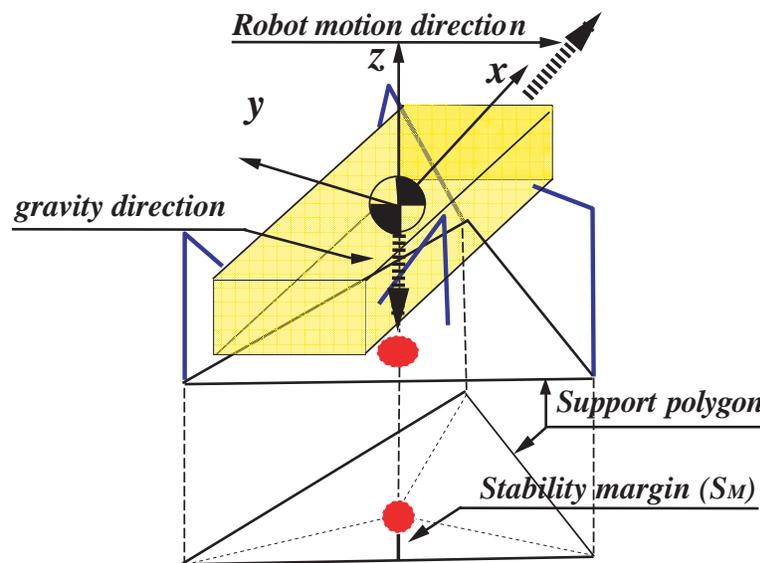


Figure 1.15: Static stability margin  $S_M$

### 静力学的な安定性評価基準

- 安定余裕 (Stability Margin  $S_M$ ) [53] : Fig.1.15 に示すように安定余裕  $S_M$  は脚移動ロボットの重心を支持脚多角形と同じ水平面上に投影したとき，重心の投影点と多角形と辺までの最小の距離である．
- 縦安定余裕 (Longitudinal Stability Margin) [4, 53] : 安定余裕のうち，重心の移動軌跡に沿って重心の投影から多角形と辺まで得られる2つの距離のうち短いほうを縦安定余裕と呼ぶ．
- 傾斜度安定余裕 (Gradient Stability Margin) [4, 53] : 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するものである．

### 動力的な安定性評価基準

- ZMP ( Zero Moment Point ) [4,10]: 歩行のあらゆる瞬間において足底接地点と路面とが形成する支持多角形の辺上あるいはその内側にピッチおよびロール軸モーメントがゼロとなる点が存在する．このような点を Zero Moment Point (ZMP) と呼ぶ．
- 転倒安定余裕 ( Tumble Stability Margin ) [12] : 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る際, 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．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安定余裕と同じ評価基準である．

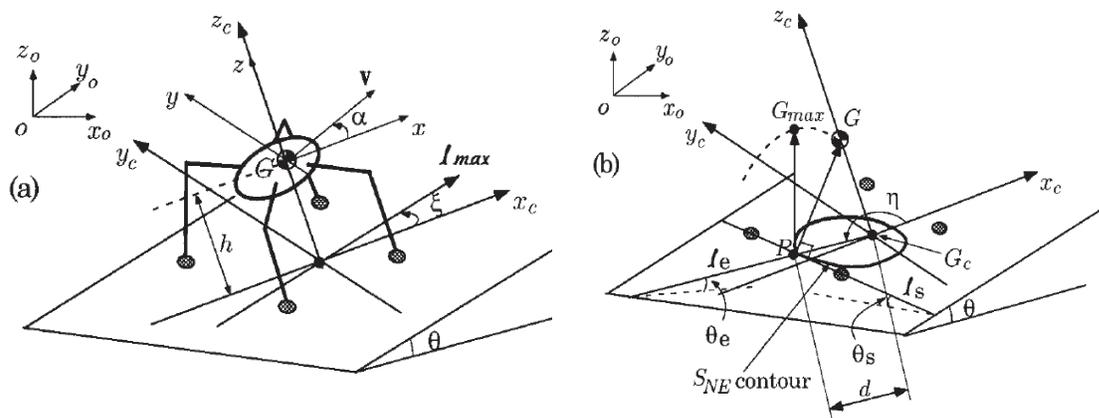


Figure 1.16: Normalized energy stability margin  $S_{NE}$

### 力学的エネルギーによる安定性評価基準

- Energy Stability Margin [31]: 歩行機械の支持脚のうち任意の2つの支持脚接地点を結ぶ軸回りに転倒が生ずる際, 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．
- 正規化エネルギー安定余裕 ( Normalized Energy Stability Margin  $S_{NE}$  ) [13]: 重心の高さが安定性に及ぼす効果を考慮し, Fig.1.16 に示すように, 転倒中心点  $P$  からみた重心の絶対座標高さ  $\overrightarrow{PG}_{z_0}$  と重心が転倒するときの軌道の最高点の高さ  $\overrightarrow{PG}_{\max z_0}$  との垂直距離の差 ( $S_{NE} = \overrightarrow{PG}_{\max z_0} - \overrightarrow{PG}_{z_0}$ ) で安定性を評価するものである． $\overrightarrow{PG}_{\max z_0}$  と  $\overrightarrow{PG}_{z_0}$  は次式で表される．

$$\overrightarrow{PG}_{z_0} = h \cos \theta + d \sin \theta_e \quad (1.2)$$

$$\overrightarrow{PG}_{\max z_0} = \sqrt{h^2 + d^2} \cos \theta_s \quad (1.3)$$

ここで、まず、2つの右手座標系、胴体座標系  $\Sigma(Gxyz)$  と接地面座標系  $\Sigma_c(G_c x_c y_c z_c)$  を想定し、重心  $G$  は接地面上の点  $G_c$  から垂直距離  $h$  だけ上方にあるものとする。Fig.1.16 に示すように、 $\Sigma(Gxyz)$  は重心  $G$  を原点とし、胴体前方を  $x$  軸、胴体上方に  $z$  軸、それと直交するように胴体平面上に  $y$  軸とする。 $\Sigma_c(G_c x_c y_c z_c)$  は  $G_c$  を原点とし、直線  $G_c G$  を  $z_c$  軸、 $x$  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、 $x_c$  軸と直交する接地面上の軸を  $y_c$  とする。次に、使用する用語を示す。 $l_s$  は接地面上の支持脚のうち、お互いに隣り合う2脚を結んだ直線である。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  $P$  とし、点  $G_c$  から  $P$  への半直線を放射軸線  $l_e$  とする。接地面の最大傾斜線  $l_{max}$  は水平面に対する角度  $\theta$  をなすものとし、最大傾斜角と呼ぶ。 $\theta_e, \theta_s$  はそれぞれ  $l_e, l_s$  軸が水平面とのなす角度を示し次のように与えられる。

$$\sin \theta_e = -\cos(\eta - \xi) \sin \theta_s \quad (1.4)$$

$$\cos \theta_s = \sqrt{1 - \sin^2(\eta - \xi) \sin^2 \theta} \quad (1.5)$$

ただし、放射軸線方位角  $\eta$  は  $x_c$  と放射軸線  $l_e$  とのなす角度である。 $\xi$  は接地面上で  $x_c$  軸と  $l_{max}$  とのなす角度であり、最大傾斜線方位角と呼ぶ。このとき NE 安定余裕 ( $S_{NE}$  は次の式に代入することで求まる)。

$$S_{NE} = \overrightarrow{PG}_{\max z_0} - \overrightarrow{PG}_{z_0} \quad (1.6)$$

$S_{NE}$  等高線は、NE 安定余裕  $S_{NE}$  を等しくする全ての転倒中心点  $P$  の集合として接地面内に描かれる閉曲線である。上式の関係を満たす  $\Sigma_c(G_c x_c y_c z_c)$  上で求めた  $(d \cos \eta, d \sin \eta, 0)$  の点の集合として求まる。なお、 $d$  は  $S_{NE}, \theta, \eta, \xi$  の関数であり、次のように誘導できる。

$$d = \frac{-B \pm \sqrt{B^2 - AC}}{A} \quad (1.7)$$

ここで、 $A = \sin^2 \theta_e$ 、 $B = (S_{NE} + h \cos \theta) \sin \theta_e$ 、 $C = (S_{NE} + h \cos \theta)^2 - h^2 \cos^2 \theta_s$  である。よって、 $S_{NE}$  等高線の描き方は  $S_{NE}, \theta, \xi$  が与えられたとき、放射軸線方位角  $\eta$  を  $0 \leq \eta \leq 2\pi$  の範囲で変化させ、それぞれの  $\eta$  方向に対応する  $G_c$  から  $P$  までの距離  $d$  を算出し得られる。

これらの評価基準は歩行環境や安定化制御の手法に応じて使い分けられる。最も広く使われているのは安定余裕である。

## 1.2.3 4脚ロボットの制御

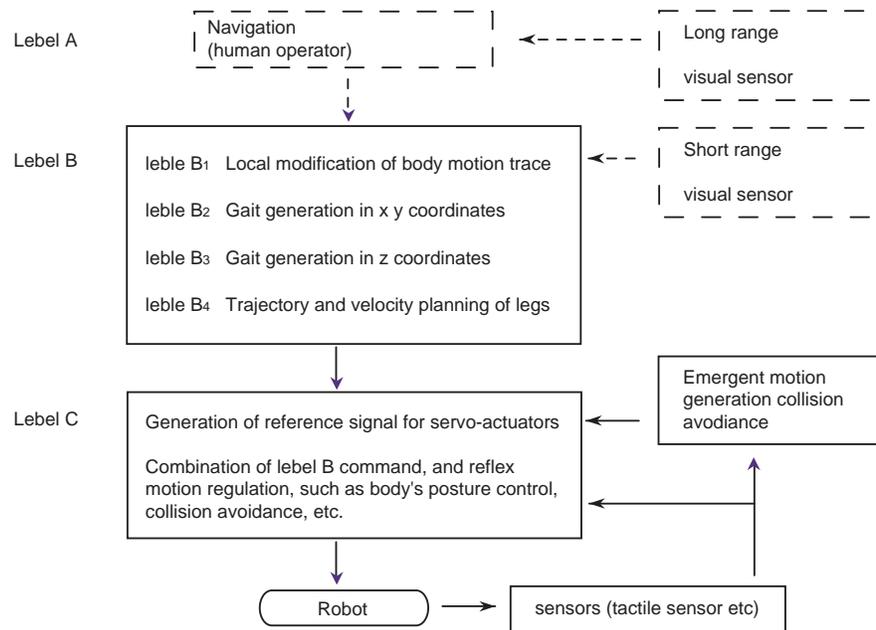


Figure 1.17: Control system of the walking robot

陸上の有肢動物，例えば馬，トラ，ライオンなどは環境に適した巧みな走行を行う．平原では効率的でリズムカルな歩行を行い，岩場では注意深く足場を探し，小川は飛び越え，荒野を縦横無尽に走り回る．動物の歩行運動は運動中枢における先天的な歩行リズムの生成と，足先などの刺激を受けて大脳半球などで行う歩行リズムの適応的な修正という階層的な神経制御系によって実現されている．しかし，これらの運動神経系の具体的な構造はほとんど解明されていない．一方，歩行機械は従来から多くの研究がなされており，歩容制御に関する報告も多くなされている．歩行機械を馬のように人間は脚の動かし方など指示しなくても馬自身が前方の地形を検出し，効率的な安全な脚運動を生成し，歩行を続けていくために馬の脳に相当する智能制御システムが不可欠である．

本節では，広瀬先生が提案した歩行機械の制御システム [6,53] を取り上げる．この歩行制御システムは，階層構造を持ち，上位レベルの制御系から歩行経路が与えられ，下位レベルの制御系において経路から歩容を決定する構造のものが提案されている．下位レベルの制御においても，与えられた経路データから脚の復帰順序を決定し，基準となる歩容を生成して，効率的な歩行を実現している．

具体的に，Fig.1.17のように3つの階層に分類することができる．

レベル A は上位からの操縦入力またはナビゲーションにより，ロボットに移動経路，歩行速度，旋回角速度などのコマンドが与えられるものである．ここでの判断は，歩行ロボットのハードウェアの種類とは無関係に，地形や作業目的から大局的になされるものである．

レベル B は知能的歩容制御系であり，さらに4つのレベルに細分化できる．レベル  $B_1$  はレベル A からの移動経路および速度を近距離前方地形の地図と照合し，障害物回避と効果的な歩行を実現する局所的経路修正を行う系である．ここでは，視覚装置との地形情報処理が必要とされる．

レベル  $B_2$  は  $xy$  座標において，脚の振り順序，重心移動量，脚の着地点の3種の制御量を求めるものである．ここでは，脚の振り順序と脚の幾何学的位置のみに関する決定が行われ，時間（速度）に関する決定はなされない．

レベル  $B_3$  は支持脚の  $Z$  軸方向の高さを決定するものである．

レベル  $B_4$  はレベル  $B_2, B_3$  で与えられた移動順序に基づいた歩行を行うため，重心の移動速度，遊脚の復帰軌道とその速度などサーボ系に与えるための具体的な目標生成を行う系である．

最下位のレベル C は運動調整系であり，時々刻々に脚の位置，センサーの状態などを入力し，上位からの指令を遂行しつつ，非常事態には対処できる動作を生成するものである．

## 1.2.4 4脚ロボットの全方位静歩行

本節では，4脚ロボットのモデル化，クロール歩容と循環歩容に基づく全方位静歩行，全方位静歩行の実現手順，歩行制御系の順で4脚ロボットの全方位静歩行の実現方法について述べる．歩行制御系としては，歩容計画，脚先端軌道計画系，軌道追従制御系に分ける．

## 4脚ロボットのモデル化

本研究の実機モデルは，Fig.1.18に示す普及型4脚ロボットTITAN-VIII [15]を用いるため，TITAN-VIIIの仕様を用いてFig.1.19に示すような4脚移動ロボットを取り扱うものとし，モデル化を行う．

まず，ロボットの胴体座標系は胴体重心を原点としロボットの前方をX軸，上方をZ軸にとった右手座標系を使用する．次に，脚番号と関節番号を設定する．脚番号の振り方は，胴体座標系のXY平面の象限と一致する．関節番号は脚の付根に近い方から第1，第2，第3関節とする．関節角度はFig.1.19の状態が全て角度が0となっている状態とし，半時計回りを正の回転方向とする．各関節の可動範囲をTable.1.1に示す．

Table 1.1: Movable region of joint

| Joint Number | Movable Region (Max) [deg] | Movable Region (Min) [deg] |
|--------------|----------------------------|----------------------------|
| Joint 1      | 90                         | -65                        |
| Joint 2      | 65                         | -65                        |
| Joint 3      | 75                         | -50                        |

胴体座標系からFig.1.20のようなリンクモデルに見立てると，第*i*脚の各関節角度と脚の姿勢とその1階微分を次式のように表す．

$$\mathbf{p}_i = \mathbf{b}_i + \mathbf{f}_i(\boldsymbol{\theta}_i) \quad (1.8)$$

$$\dot{\mathbf{p}}_i = \mathbf{J}_i(\boldsymbol{\theta}_i) \cdot \dot{\boldsymbol{\theta}}_i \quad (1.9)$$

ここで， $\mathbf{p}_i$ は第*i*脚の先端位置， $\dot{\mathbf{p}}_i$ は第*i*脚の先端速度， $\mathbf{b}_i$ は第*i*脚の付根位置， $\boldsymbol{\theta}_i$ は第*i*脚の関節角度， $\dot{\boldsymbol{\theta}}_i$ は第*i*脚の関節角速度を意味する． $\mathbf{f}_i$ は関節角度と脚先端位置の関係， $\mathbf{J}_i$ は関節角速度と脚先端速度の関係を表し， $i = 1 \text{ or } 2$ の場合，次式ようになる．

$$\mathbf{f}_i(\boldsymbol{\theta}_i) = \begin{bmatrix} -S_1(l_1 + C_2L_2 + S_{23}l_3) \\ C_1(l_1 + C_2l_2 + S_{23}l_3) \\ S_2l_2 + C_{23}l_3 \end{bmatrix} \quad (1.10)$$

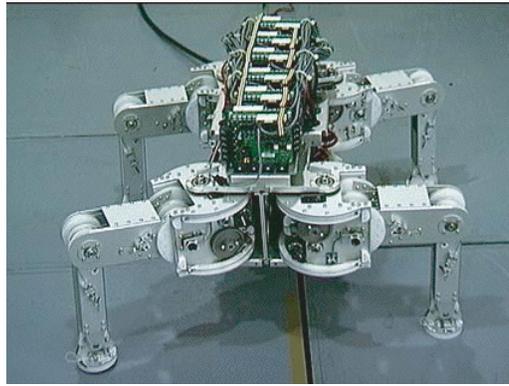


Figure 1.18: A quadruped robot: TITAN-VIII

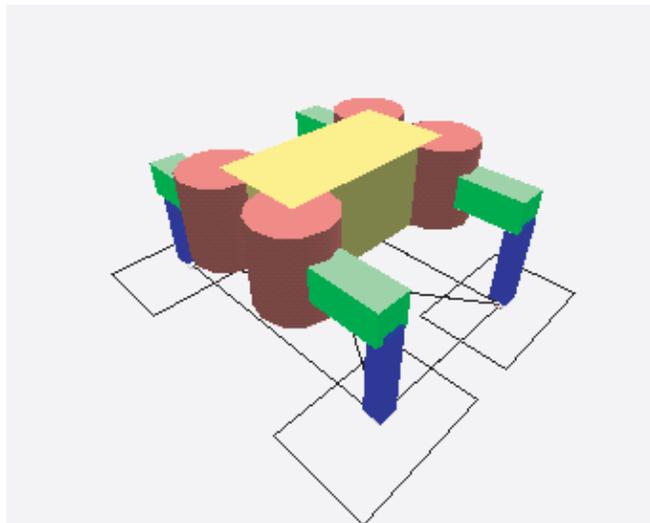


Figure 1.19: Quadruped robot model

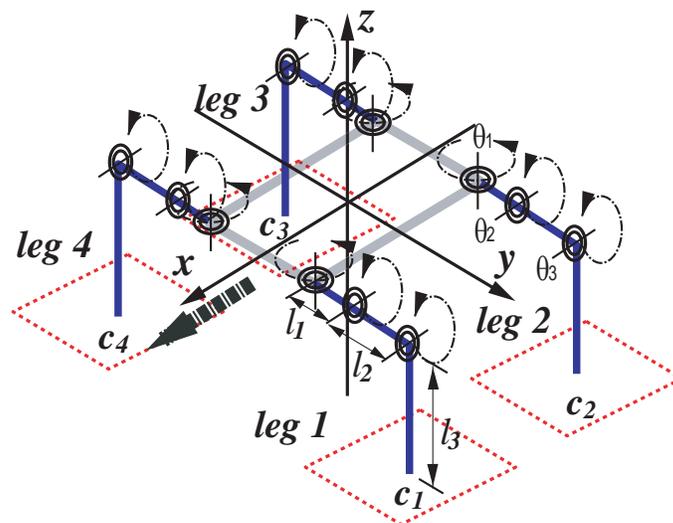


Figure 1.20: Link model of quadruped robot

$$J_i(\theta_i) = \begin{bmatrix} -C_1(l_1 + K_{23}) & S_1L_{23} & -S_1C_{23}l_3 \\ -S_1(l_1 + K_{23}) & -C_1L_{23} & C_1C_{23}l_3 \\ 0 & K_{23} & S_{23}l_3 \end{bmatrix} \quad (1.11)$$

$l_1, l_2, l_3$  はそれぞれ第 1 リンク, 第 2 リンク, 第 3 リンクの長さである. それ以外の記号はそれぞれ,

$$\begin{aligned} S_j &= \sin(\theta_j) & C_j &= \cos(\theta_j) \\ S_{jk} &= \sin(\theta_j + \theta_k) & C_{jk} &= \cos(\theta_j + \theta_k) \\ K_{23} &= C_2l_2 + S_{23}l_3 & L_{23} &= S_2l_2 - C_{23}l_3 \end{aligned} \quad (1.12)$$

の通りである.  $i = 3$  or  $4$  のときは第 1 関節の初期角度を  $i = 1$  or  $2$  の場合に  $\pi$  だけを加えた形になる.

### クロール歩容と循環歩容に基づく全方位静歩行

4 脚ロボットの静歩行において, 最も基本となる歩行パターンは Fig.1.7 に示すクロール歩容である. 任意の旋回中心回りのクロール歩容は緩やかな旋回だけでなく, 旋回中心を無限遠方にとることで並進歩行をも実現することができる. しかし, 旋回中心が胴体重心に近くなるとクロール歩容より Fig.1.14 に示す循環歩容の方がより安定性が高く旋回速度も速くなることが知られている [6, 21]. したがって, 安定でしかも最大歩行速度を有する定常的な静歩行を実現するには, 最大旋回角速度を実現する任意の旋回中心回りのクロール歩容と循環歩容を用いれば十分で, またこれらの歩容を連続的に遷移させることができると全方位への連続的な静歩行が可能となる.

全方位静歩行は, 入力される歩行速度と旋回角速度から旋回中心を求め, その位置によりクロール歩容と循環歩容のどちらかを選択し, 旋回中心が変化する時は各歩行パターン間の遷移を連続的に行うことで, あらゆる方向へ停止することなく歩行することができる. 歩行速度と旋回角速度も旋回中心位置が変化する歩容遷移と捉え, 停止状態から最高速度まであらゆる歩行パターンを実現している.

水平面における全方位静歩行の 4 脚ロボットの基準姿勢は, Fig.1.19 のようになる. また, その全方位静歩行には以下のような条件がある.

- デューティ比は 0.75 としている.
- 操縦入力は歩行速度と旋回角速度である.
- 安定性評価基準は安定余裕 ( $S_M$ ) [53] であり,  $S_M=0$  までを認めている.
- 水平面上の脚可動範囲は脚基準位置  $C_i$  を中心とした長方形と仮定し, 原点に対して対称である.
- 座標系は Fig.1.20 に示すように, 原点がロボットの重心で, X 軸をロボットの前方向, Z 軸を上方にとった胴体座標系である.

本研究の従来研究では、水平面において提案した全方位静歩行手法の有効性を検証するため、実機ロボット TITAN-VIII (Fig.1.18) を用いて歩行実験を行った。各基準歩容による歩行と歩容遷移が連続的に実現できることが確認されていた [23]。

### 全方位静歩行の実現手順

水平面における全方位静歩行の実現手順としては「基準歩容の計画」と「連続的な歩容遷移」の2つの部分に分けられる。具体的に、

基準歩容の計画： 旋回中心位置より歩容を選択してから、脚可動範囲を基にして脚先端の位置と軌道を計画する。

1. 旋回中心の位置から歩容を選択する。
2. 脚可動範囲から遊脚の着地位置と支持脚の終了位置を求める。
3. 脚先端の軌道計画を行う。

連続的な歩容遷移： 旋回中心の変更に応じて歩容を連続的に遷移させる。

1. 新しい旋回中心の位置より次の歩容を選択する。
2. 現在の歩容の脚位置から新しい歩容の脚位置へ順次脚を動かしていく。

本論文での基準歩容は全方位静的な歩行が連続的に行なえるための任意の旋回中心回りのクロール歩容と循環歩容であり、クロール歩容と循環歩容をできる限り少ない歩数で遷移するために、歩容遷移前後で共通な脚配置が存在するように設計した歩容である。この基準歩容は、胴体重心の旋回回転速度と1サイクル歩行中の重心旋回角度を最大化する基準旋回歩容 [5] と違って、できる限り少ない歩数で歩容遷移を完了させるために遷移前の歩容と遷移後の歩容とで共通の脚配置が存在するように設計される歩容である。基準歩容で共通となる脚配置としては、基準姿勢における支持脚の位置を脚基準位置  $c_i$  として用いる。この基準歩容を用いて、任意の方向への歩行と連続的な歩容遷移が可能となり、基準姿勢からの歩行開始や基準姿勢への歩行停止などを統一的な手法で実現できる。本論文での基準歩容とするクロール歩容と循環歩容は旋回中心の位置により選択するが、クロール歩容と循環歩容の設計の差は旋回中心の位置と遊脚順序だけであり、他は全く同一である。

### クロール歩容と循環歩容による歩行制御系の概要

全方位静歩行を実現するために歩容計画系を用いて歩行制御系の構築は不可欠である。本研究の歩行制御系としては、

1. 歩容計画系、

2. 脚先端軌道計画系，
3. 軌道追従制御系.

に大きく分ける．さらに，実際にロボットを動かすには操縦入力インターフェース，関節角度出力インターフェースも必要である．本節では，歩容計画系，脚先端軌道計画系，軌道追従制御系について述べる．これらの3つは制御階層を形成し，処理は歩容計画，脚先端軌道計画，軌道追従制御の順に実行される．

### 歩容計画系

歩容計画系は，操縦入力から指定された歩行速度と旋回角速度を受け，必要に応じて調整後，旋回中心の位置を求め，最終的には遊脚運動を開始するタイミング，遊脚の着地位置とその他脚運動を行うために必要となる各パラメータの算出を行う系である．クロール歩容と循環歩容による歩容計画系では，遊脚順序やその着地位置などは旋回中心位置から選ばれた基準歩容に従う．Fig.1.21 にこの歩容計画系の流れを示す．

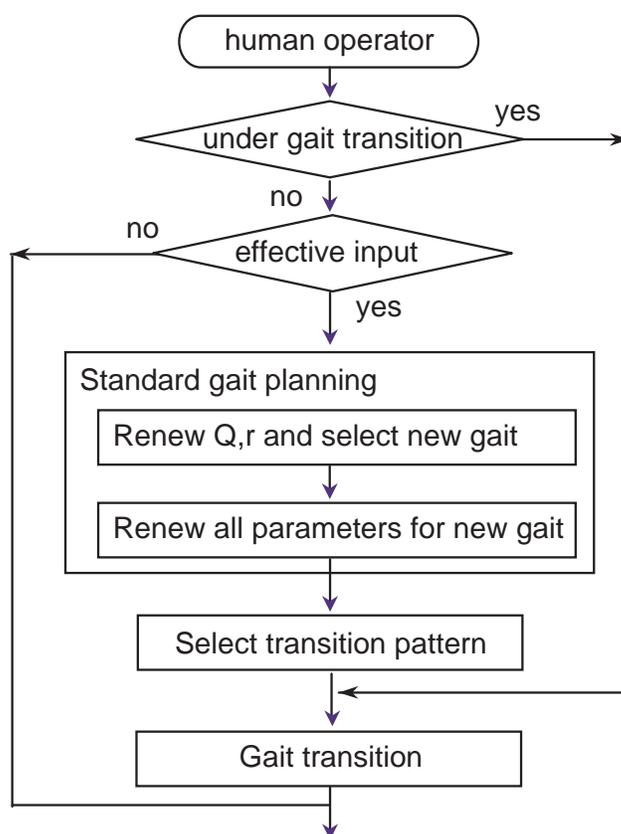


Figure 1.21: Gait planing structure

具体的に，

- 1．旋回中心および旋回半径を更新する
  - 2．旋回中心から歩容を選択する
  - 3．脚軌道と脚可動範囲の交点を求める
  - 4．脚基準位置，脚軌道と脚可動範囲の交点の偏角を求める
  - 5．実行可能な旋回角速度を算出する
  - 6．遊脚の着地位置と支持脚の終了位置を算出する
- という処理の流れになり，第2.3節にて詳細に述べる．

### 脚先端軌道計画系

脚先端軌道計画系は歩容計画系から渡された各パラメータを用いて歩行を行うために必要となる，遊脚と支持脚の先端軌道の計画を行う系である．遊脚軌道は開始位置  $P_{si}$  と終了位置  $P_{ei}$  とを結んだ曲線のことであり，本研究では  $\cos$  関数曲線を用いて指令位置  $P_{di}$  と指令速度  $\dot{P}_{di}$  を与える．

$$P_{di} = \begin{bmatrix} \frac{P_{six} - P_{eix}}{2} \cos\left(\frac{\pi}{T_{sw}} t_i\right) \\ \frac{P_{siy} - P_{eiy}}{2} \cos\left(\frac{\pi}{T_{sw}} t_i\right) \\ \frac{h_{sw}}{2} \left\{1 - \cos\left(\frac{2\pi}{T_{sw}} t_i\right)\right\} \end{bmatrix} + \frac{1}{2} (P_{si} + P_{ei}) \quad (1.13)$$

$$\dot{P}_{di} = \begin{bmatrix} -\frac{P_{six} - P_{eix}}{2} \frac{\pi}{T_{sw}} \sin\left(\frac{\pi}{T_{sw}} t_i\right) \\ -\frac{P_{siy} - P_{eiy}}{2} \frac{\pi}{T_{sw}} \sin\left(\frac{\pi}{T_{sw}} t_i\right) \\ h_{sw} \frac{\pi}{T_{sw}} \sin\left(\frac{2\pi}{T_{sw}} t_i\right) \end{bmatrix} \quad (1.14)$$

ここで， $T_{sw}$  は遊脚時間である．支持脚軌道は円弧であるため，指令位置  $P_{di}$  と指令速度  $\dot{P}_{si}$  は偏角  $\phi_{di}$  を用いて次のように求まる．

$$\phi_{di} = \phi_{ei} - \dot{\theta}(t_i - T_{sw}) \quad (1.15)$$

$$P_{di} = \begin{bmatrix} Q_x + r_i \cos(\phi_{Di} + \theta_{el}) \\ Q_y + r_i \sin(\phi_{Di} + \theta_{el}) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (1.16)$$

$$\dot{\mathbf{p}}_{di} = \begin{bmatrix} -r_i \sin(\phi_{di}) \dot{\phi}_{di} \\ r_i \cos(\phi_{di}) \dot{\phi}_{di} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_i \sin(\phi_{di}) \dot{\theta} \\ -r_i \cos(\phi_{di}) \dot{\theta} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (1.17)$$

## 軌道追従制御系

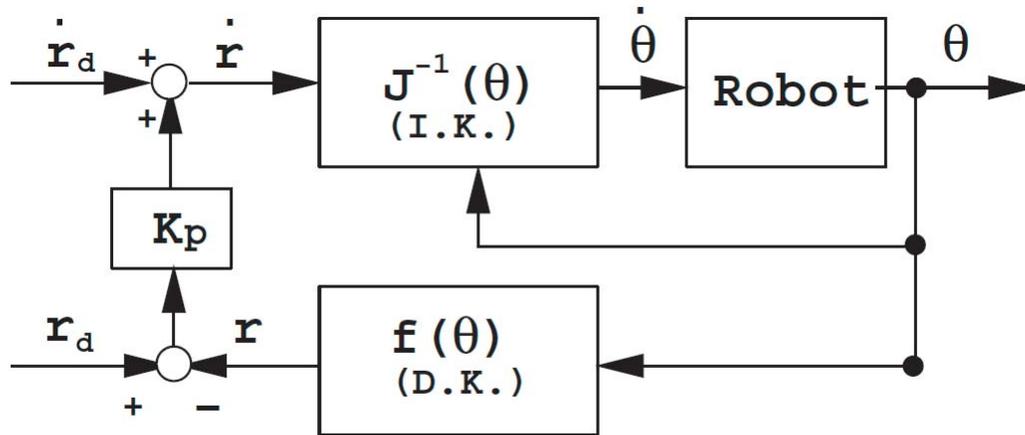


Figure 1.22: Resolved motion rate control

脚先端の軌道追従制御には、分解速度制御法 (RMRC: Resolved Motion Rate Control) を用いる。脚先端軌道計画系から得られた軌道を分解速度制御法で追従することで歩行に必要な脚先の位置と脚の姿勢を生成する。分解速度制御法のブロック線図を Fig.1.22 に示す。数式で表すと、次のようになる。

$$\dot{\mathbf{p}}(t + dt) = \dot{\mathbf{p}}_d(t + dt) + K_p(\mathbf{p}_d(t + dt) - \mathbf{p}(t)) \quad (1.18)$$

$$\dot{\boldsymbol{\theta}}(t + dt) = \mathbf{J}^{-1}(\boldsymbol{\theta}(t))\dot{\mathbf{p}}(t + dt) \quad (1.19)$$

$$\boldsymbol{\theta}(t + dt) = \boldsymbol{\theta}(t) + \dot{\boldsymbol{\theta}}(t + dt)dt \quad (1.20)$$

$$\mathbf{p}(t + dt) = \mathbf{f}(\boldsymbol{\theta}(t + dt)) \quad (1.21)$$

式 (1.18) は位置のフィードバックによる誤差の修正を意味する。式 (1.19) は速度レベルの逆運動学である。逆運動学そのものを解くのは難しく、解も複数存在する可能性がある。しかし、ヤコビ行列が正則である限り簡単に解ける。式 (1.20) はオイラー積分である。本来の分解速度法はまず、式 (1.19) によって得られる角速度を発生するトルクをロボットに入力し、そして、実際にロボットが運動した

結果として関節角度を得られることになっている。本研究の歩行制御プログラムでは実機に対して関節角度の指令のみのオープンループ制御である。関節角度のフィードバックがないため、式 (1.20) のオイラー積分で関節角度を得ることにした。このようにして取得した関節角度を式 (1.21) の順運動学式に代入すると、脚先端位置を得ることができる。これを式 (1.18) にフィードバックする。以上のことによって、分解速度制御法を用いた脚先端の軌道追従を行う。

## 1.3 本研究の目的

前節までにクロール歩容と循環歩容に基づく全方位静歩行手法について述べた。しかし、この全方位静歩行手法は水平面に限定されているため、4脚ロボットの高い対地適応性を有効に生かしていなかった。その4脚ロボットの高い対地適応性を有効に生かすために、傾斜面上における全方位静歩行への拡張を行い、胴体を水平に保ったままの傾斜面上の歩行や、胴体を傾斜面と平行にした状態での歩行についても検討を行った。胴体水平の場合、搬送作業などには有利であるものの、傾斜面の傾斜角が大きくなると脚可動範囲が小さくなり、移動速度が著しく低下してしまう。また、ロボットの胴体を Roll, Pitch, Yaw の3軸回りに任意に回転させ、その姿勢を維持した状態での傾斜面上における全方位静歩行をも実現させている。胴体を傾斜面と平行にした状態の場合、連続的な歩容遷移を行うために設定した脚基準位置を胴体傾斜に応じてシフトさせる必要があるため、傾斜面の傾斜角に応じて脚基準位置のシフト量が大きくなり、使用可能な脚可動範囲が結果的に狭くなってしまう。即ち、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っている。

そこで、本研究ではまず、シミュレーション実験によって、4脚ロボットの移動速度について脚可動範囲と脚位置シフト量のトレードオフの関係を検討し、傾斜面上において移動速度を最大にする最適な胴体姿勢が存在することを検証する。次に、傾斜面歩行環境に応じて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、その最適な胴体姿勢を有しながら傾斜面上において連続的に歩容遷移を行う手法を提案する。傾斜面上における最適な胴体姿勢とは、クロール歩容に対して任意の移動方向及び指定された方向、循環歩容に対してその場の旋回について導出した移動速度を最大にする胴体姿勢である。これらの歩容を組み合わせることによって最適な胴体姿勢を有する全方位静歩行を実現している。一方、これまでの研究ではロボットの重心から接地面までの垂直距離（重心高さ）が固定されたままで、重心高さを積極的に変更することによって脚可動範囲が大きくなったり脚基準位置のシフト量が小さくなったりすることで移動速度の向上と安定性の向上に有効に利用されていない。本研究ではさらに、傾斜面上における4脚ロボットの安定性の向上、移動速度の最大化及び全方位静歩行の実現を統合的に議論し、積極的に重心高さと胴体姿勢を変更することによって傾斜面の傾斜角とロボットの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を誘導する。なお、その重心高さを生かしながら最適な胴体姿勢を有する連続的な歩容遷移手法を提案する。重心高さを生かしながら最適な胴体姿勢の誘導には3脚支持期間の安定性を考慮しており、さらに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、確実に高い移動速度で安定した傾斜面全方位静歩行を実現している。提案する手法の有効性は計算機シミュレーション及び実機実験により検証する。ここで、本論文では歩行中に4脚支持期間を用いず、3脚支持期間のみで歩行する。

## 1.4 本論文の構成

本論文は以下のような構成になっている。

- 第1章では、4脚ロボットに関する研究の背景、従来研究及び本研究の目的について説明した。
- 第2章では、4脚ロボットの対地適応性を向上させるため、水平面上の全方位静歩行手法を傾斜面に拡張し、ロボットの胴体を Roll, Pitch, Yaw の3軸回りに任意に回転させ、重心高さを任意に維持した状態での斜面全方位静歩行の実現する方法について述べる。シミュレーション実験によって、4脚ロボットの移動速度について脚可動範囲と脚位置シフト量のトレードオフの関係を検討し、傾斜面上において移動速度を最大にする最適な胴体姿勢が存在することを検証する。
- 第3章では、勾配法を用いて非線形最適化問題となる最適な胴体姿勢の誘導法について述べ、その最適な胴体姿勢を有しながら傾斜面上において連続的に歩容遷移を行う手法を提案する。
- 第4章では、まず、重心高さによる安定性と移動速度への影響について検討し、その安定性の検討に必要となる3脚支持期間の安定性について詳細に述べる。そして、逐次2次計画法を用いて安定性を考慮した制約付き非線形最適化問題となる重心高さを生かした最適な胴体姿勢を誘導し、誘導した重心高さを生かした最適な胴体姿勢を有しながら傾斜面上において連続的に歩容遷移を行う手法を提案する。
- 第5章では、シミュレーション実験および実機実験により、提案する手法の有効性を検証する。
- 第6章では、本論文のまとめと今後の課題について述べる。

## 第2章 傾斜面における全方位静歩行

### 目次

---

|       |                              |    |
|-------|------------------------------|----|
| 2.1   | はじめに . . . . .               | 30 |
| 2.2   | 傾斜面上の全方位静歩行手法 . . . . .      | 31 |
| 2.2.1 | 座標系の設定 . . . . .             | 31 |
| 2.2.2 | 脚可動領域と脚可動範囲 . . . . .        | 32 |
| 2.2.3 | 傾斜面における脚基準位置 . . . . .       | 34 |
| 2.3   | 傾斜面における基準歩容の計画 . . . . .     | 39 |
| 2.3.1 | 旋回中心位置の導出 . . . . .          | 39 |
| 2.3.2 | 旋回中心位置による歩容の選択 . . . . .     | 41 |
| 2.3.3 | 遊脚着地位置と支持脚終了位置 . . . . .     | 41 |
| 2.3.4 | 脚先端軌道の計画 . . . . .           | 47 |
| 2.4   | 傾斜面における連続的な歩容遷移 . . . . .    | 48 |
| 2.4.1 | クロール歩容からクロール歩容への遷移 . . . . . | 49 |
| 2.4.2 | クロール歩容から循環歩容への遷移 . . . . .   | 52 |
| 2.4.3 | 循環歩容からクロール歩容への遷移 . . . . .   | 55 |
| 2.4.4 | 循環歩容から循環歩容への遷移 . . . . .     | 57 |
| 2.5   | 胴体姿勢による移動速度への影響 . . . . .    | 59 |
| 2.6   | おわりに . . . . .               | 61 |

---

## 2.1 はじめに

前章において、水平面における4脚ロボットの全方位静歩行の実現手法について概要的に述べた。この手法は、任意の旋回中心回りのクロール歩容と循環歩容を組み合わせることによって、連続的に全方位歩行を実現できる方法である。しかし、この手法では水平面上に限られているため、4脚ロボットの高い対地適応性を有効に生かしていない。

本章では4脚ロボットの対地適応性を向上させるため、その水平面上の全方位静歩行手法を傾斜面に拡張し、ロボットの胴体を Roll, Pitch, Yaw の3軸回りに任意に回転させ、重心高さを任意に維持した状態での斜面全方位静歩行を実現する方法について述べる。また、シミュレーション実験によって、4脚ロボットの移動速度について脚可動範囲と脚位置シフト量のトレードオフの関係を検討し、傾斜面上において移動速度を最大にする最適な胴体姿勢が存在することを検証する。

本論文で提案する手法は、従来の胴体を水平に維持した状態での斜面全方位歩行で用いられた手法を拡張したものである。本研究では水平面における手法を応用するために、以下の4つを新たに設計し、任意の重心高さや胴体姿勢を維持した状態での斜面全方位静歩行を実現する。

- (1) ロボットの重心高さ、胴体姿勢と斜面との関係
- (2) 傾斜面における脚可動範囲
- (3) 傾斜面における脚基準位置
- (4) 傾斜面におけるロボットの重心および支持脚軌道

本章ではロボットの胴体を Roll, Pitch, Yaw の3軸回りに回転可能とし、ロボットの重心高さや胴体姿勢を任意に維持した状態での傾斜面における全方位静歩行を実現する方法について述べる。

まず、必要となる座標系の設定、脚可動範囲と可動領域及び斜面における脚基準位置の決定法について述べる。

次に、傾斜面上における4脚ロボットの重心および支持脚軌道について述べる。

そして、傾斜面上における歩容計画、連続的な歩容遷移手法について述べる。

最後に、傾斜面において脚可動範囲の大きさと脚位置シフト量の間にトレードオフの関係について述べる。

## 2.2 傾斜面上の全方位静歩行手法

本節では，ロボットの重心高さとお体姿勢を任意にさせた状態での斜面全方位静歩行を実現するために，次に示す設定を行い，詳細に述べる．

まず，ロボットの重心高さとお体姿勢と傾斜面の関係を表すために3つの右手座標系（お体座標系，水平面座標系，傾斜面座標系）を設定する．

次に，傾斜面上において全方位静歩行を実現するため，必要となる傾斜面上における脚可動範囲の導出方法について述べる．

そして，重心高さとお体姿勢を任意にさせた時の脚基準位置の決定法について述べる．

これら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を斜面に拡張することができる．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．さらに，移動速度と安定性の向上に重心高さとお体姿勢を積極的に変更することが可能となる．

### 2.2.1 座標系の設定

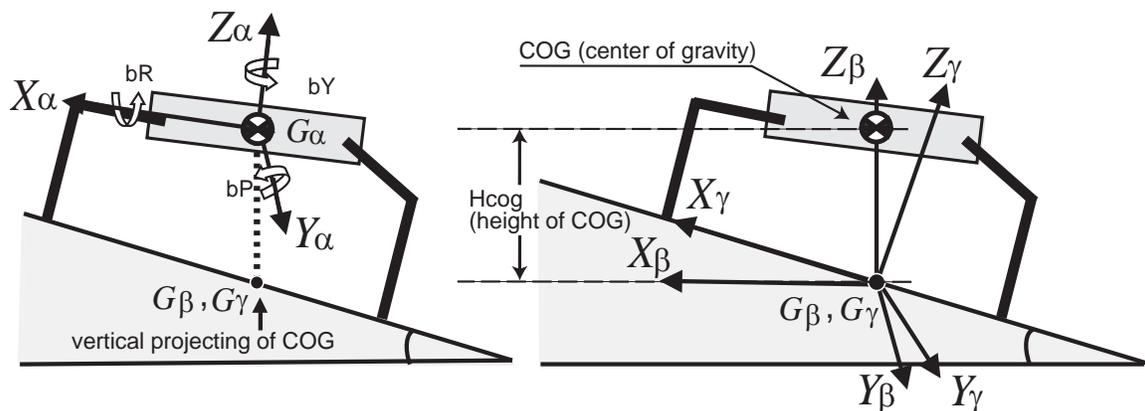


Figure 2.1: Coordinates (Body coordinate  $\Sigma_\alpha$ , Horizontal coordinate  $\Sigma_\beta$  and Slope coordinate  $\Sigma_\gamma$ )

本論文の4脚ロボットの歩行環境は一定の傾斜角  $\psi$  を有する傾斜面とする．水平面において ( $\psi = 0$  の場合) 最適なお体姿勢は基準姿勢となるため検討対象外とする．ロボットの重心から接地面までの鉛直距離（お体重心高さ）は  $H_{cog}$  とする．ロボットのお体姿勢は *Roll, Pitch, Yaw* 3軸回りの回転角度  $\psi_{bR}, \psi_{bP}, \psi_{bY}$  で表す．Fig.2.1に示すように3つの右手座標系，お体座標系  $\Sigma_\alpha$ ，水平面座標系  $\Sigma_\beta$  と傾斜面座標系  $\Sigma_\gamma$  を設定する．

胴体座標系  $\Sigma_\alpha$  : 原点  $G_\alpha$  はロボットの重心 (COG), X 軸方向をロボットの前方, Z 軸方向をロボットの上方とする. それと直交するように胴体平面上に Y 軸とする.

水平面座標系  $\Sigma_\beta$  : 原点  $G_\beta$  はロボットの重心の重力線と傾斜面の交点, X 軸と Y 軸を  $\Sigma_\alpha$  の X 軸と Y 軸の水平面への投影, Z 軸方向を水平面に垂直で上方とする.

傾斜面座標系  $\Sigma_\gamma$  : 原点  $G_\gamma$  は  $G_\beta$  と一致し, 傾斜面上の重心投影点である. X 軸は傾斜面の最大傾斜線であり, 水平面に対し角度  $\psi$  をなすものとする. Z 軸を傾斜面と垂直方向, それと直交するように傾斜面上に Y 軸とする. 各軸の求め方としては座標系  $\Sigma_\beta$  を  $\psi_{bY}$  だけ Z 軸回りに回転させたあと, 回転後の相対座標系を Y 軸回りに  $-\psi$  だけ回転させた方向である. それぞれの回転変換行列を  $\mathbf{E}^{k\psi_{bY}}$ ,  $\mathbf{E}^{j\psi}$  とする.

したがって,  $\Sigma_\gamma$  から  $\Sigma_\beta$  への同次変換行列  ${}^\beta\mathbf{T}_\gamma$  は次式で与える.

$${}^\beta\mathbf{T}_\gamma = \left[ \begin{array}{ccc|c} \mathbf{E}^{j\psi}\mathbf{E}^{k\psi_{bY}} & & & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right] \quad (2.1)$$

また,  $\Sigma_\beta$  から  $\Sigma_\alpha$  への同次変換行列  ${}^\alpha\mathbf{T}_\beta$  は

$${}^\alpha\mathbf{T}_\beta = \left[ \begin{array}{ccc|c} \mathbf{E}^{j\psi_{bP}}\mathbf{E}^{i\psi_{bR}} & & \mathbf{E}^{j\psi_{bP}}\mathbf{E}^{i\psi_{bR}}\mathbf{p} & \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right] \quad (2.2)$$

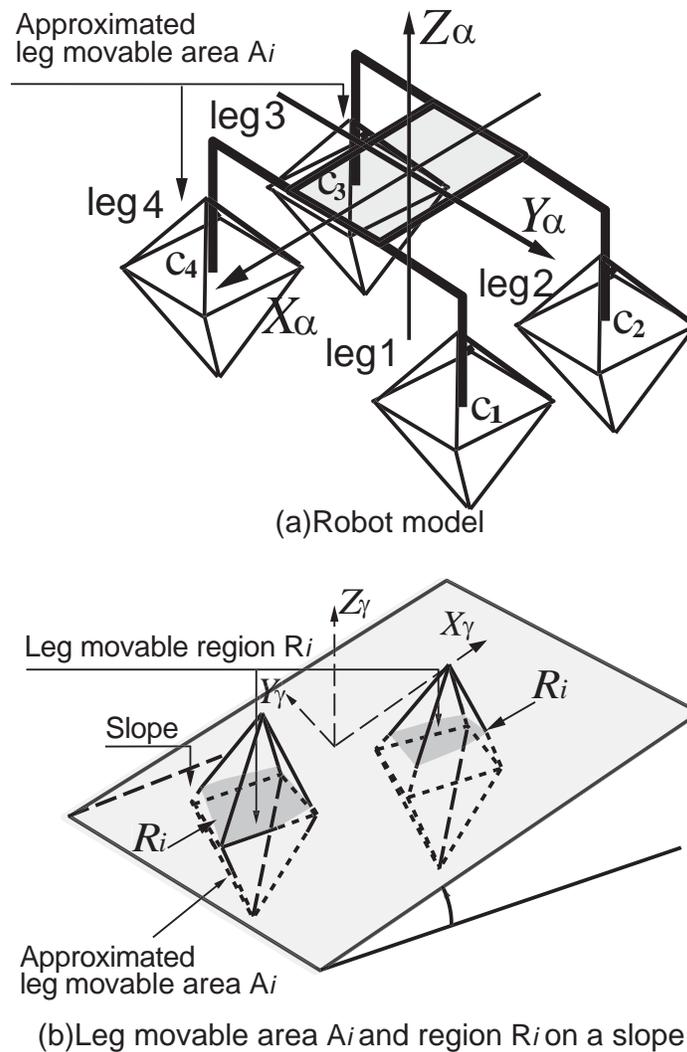
となる. ここで,  $\mathbf{E}^{j\psi_{bP}}\mathbf{E}^{i\psi_{bR}}$  は座標系  $\Sigma_\beta$  をその X 軸回りに  $\psi_{bR}$  で回転し, 回転後の相対座標系をその Y 軸回りに  $\psi_{bP}$  で回転した際の回転変換行列であり,  $\mathbf{p}$  ( $\mathbf{p} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -H\text{cog} \end{bmatrix}^T$ ) は  $\Sigma_\alpha$  から  $\Sigma_\beta$  への平行移動ベクトルである.  $\Sigma_\gamma$  から  $\Sigma_\alpha$  への同次変換行列  ${}^\alpha\mathbf{T}_\gamma$  は

$${}^\alpha\mathbf{T}_\gamma = {}^\alpha\mathbf{T}_\beta {}^\beta\mathbf{T}_\gamma \quad (2.3)$$

と求まる. 本研究では, 歩容計画を傾斜面座標系  $\Sigma_\gamma$  で行い, 歩行制御を胴体座標系  $\Sigma_\alpha$  で行う手法を使用する.

## 2.2.2 脚可動領域と脚可動範囲

本研究では, 簡単のために Fig.2.2(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, Fig.2.2(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, 従来研究 [23] 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, 実機モデル TATIAN-VIII(Fig.1.18)

Figure 2.2: Robot model, leg movable area  $A_i$  and region  $R_i$ 

の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。傾斜面上における脚可動範囲  $R_i$  は Fig.2.2(b) に示すように  $A_i$  を傾斜面で切った時の切り口であり、脚可動領域  $A_i$  と傾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脚可動領域  $A_i$  においても適用可能である。

水平面の全方位静歩行手法を傾斜面に適用するためには、傾斜面上における脚可動範囲を決めなければならない。ここで脚可動範囲とは脚の動ける範囲を平面で表したものとし、必ず多角形になるとする。脚の可動領域は重心高さまたは胴体姿勢が変わると、脚が移動できる幅が変化するため傾斜面に応じて脚が移動できる範囲も変わってしまう。そのため、重心高さや胴体姿勢に応じてこの脚の可動領域から歩容計画に必要な傾斜面上の脚可動範囲を求めなければならない。傾斜

面上の脚可動範囲は，Fig.2.2のように8面体の脚可動領域を傾斜面で切ったときの切口となる．つまり座標系  $\Sigma_\gamma$  から脚可動領域を見たとき，座標系  $\Sigma_\gamma$  の  $xy$  平面と交わる点をつないだ多角形が，斜面における脚可動範囲となる．傾斜面上における脚可動範囲を導出することにより，傾斜面上で脚が移動できる範囲を明確に示すことができる．

### 2.2.3 傾斜面における脚基準位置

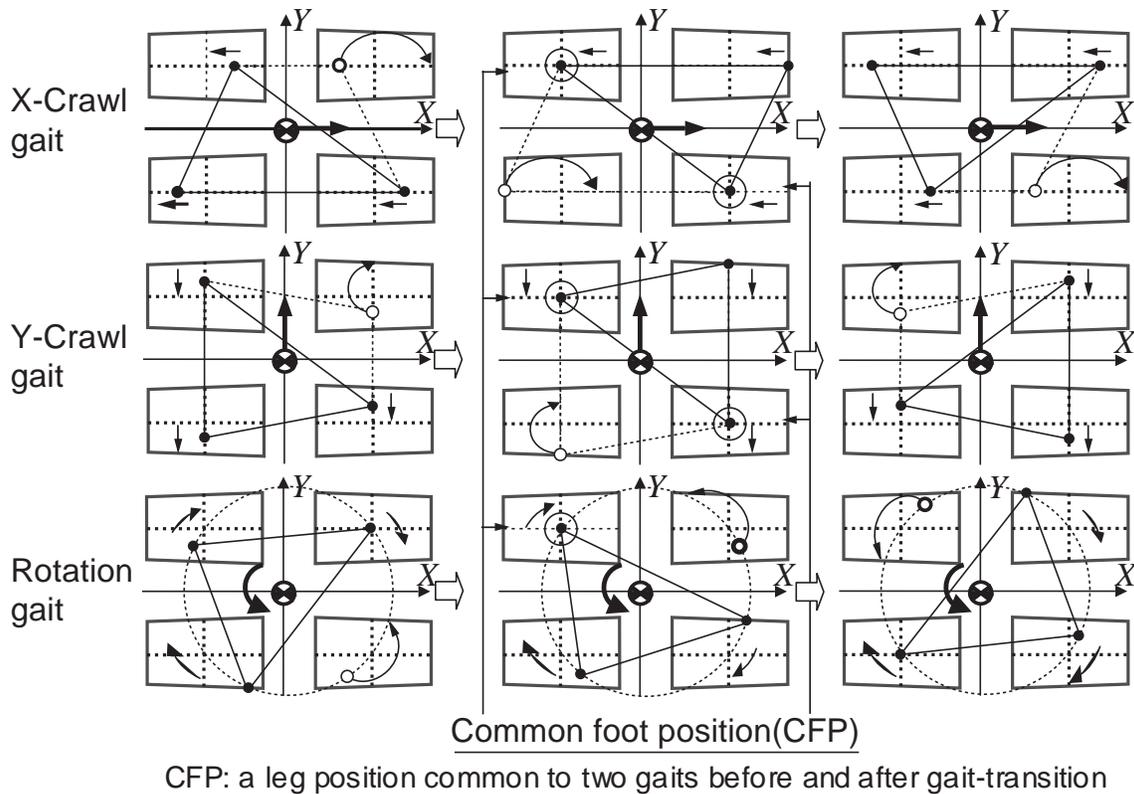
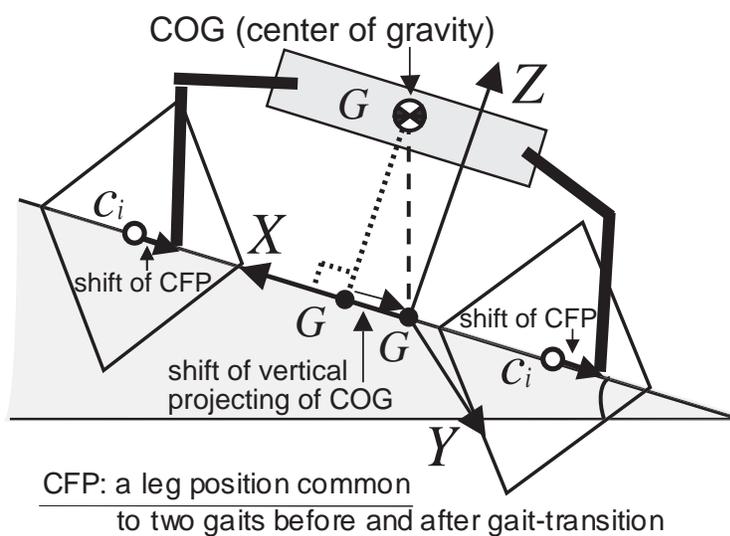
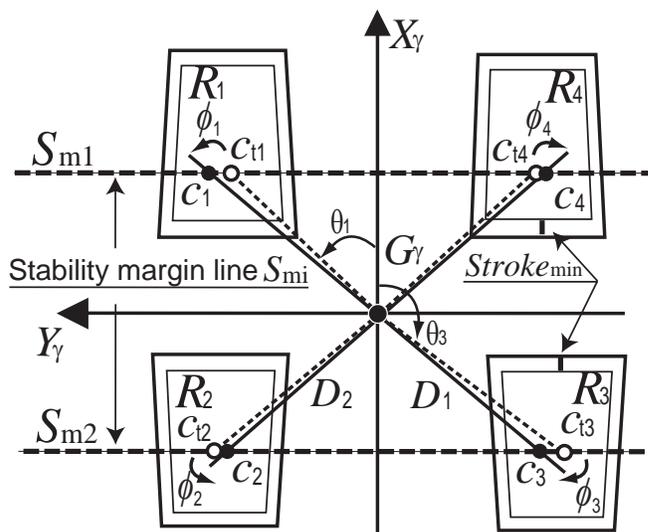


Figure 2.3: Common foot position for each walking gait on a slope

できる限り少ない歩数で歩容遷移を完了させるため，Fig.2.3に示すように，遷移前後の歩容で共通の脚基準位置が存在するように設定する [23]．脚基準位置の配置は支持脚対角線上に必ず重心投影点に乗っていないといけない．このような脚基準位置の設定により，停止状態からでもあらゆる方向へ移動することができ，どの脚を遊脚しても安定性を維持することができる．胴体が水平の場合，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  $G_\gamma$  が乗ることを保証している．つまり，脚基準位置の配置は支持脚対角線  $D_i$  上に重心投影点  $G_\gamma$  が乗ることを保証している．しかし，胴体姿勢を任意に傾斜させた場合，Fig.2.4(a)に示すように，重心投影点のシフトに応じて傾斜面上にある脚基準位置もシフトする必要



(a) Shift of the vertical projecting of COG and CFP for walking on a slope



(b) Leg movable region and CFP on a slope

Figure 2.4: Calculation of common foot position (CFP)

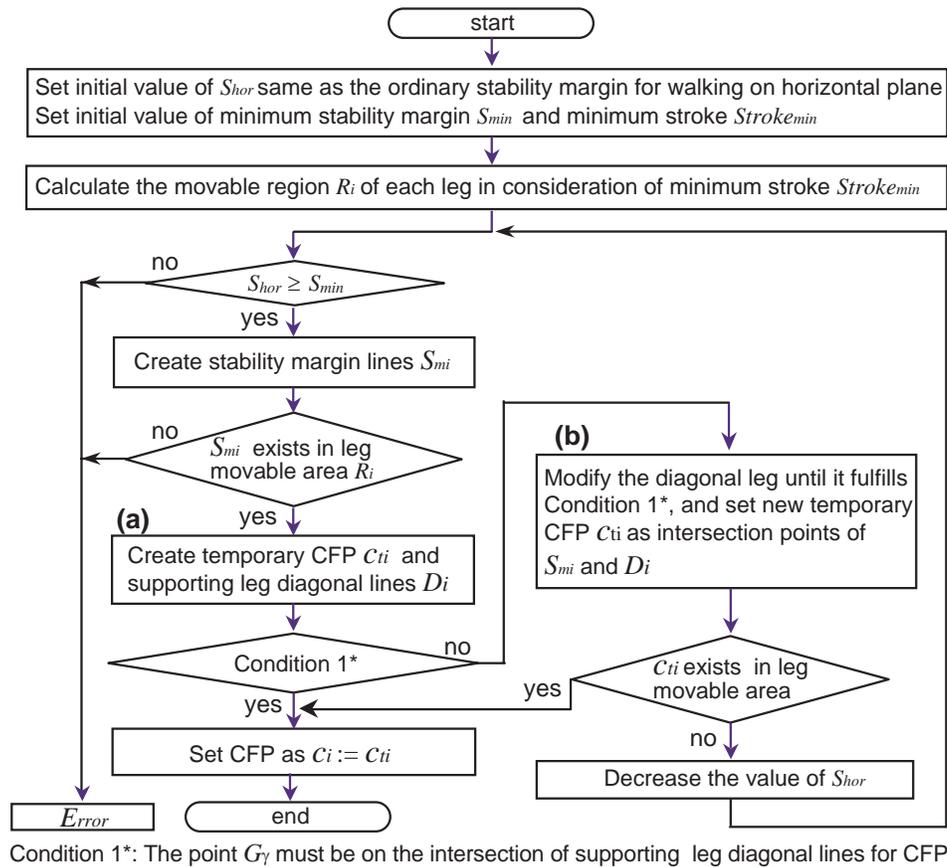


Figure 2.5: Algorithm of common foot position (CFP)

がある。

本研究の全方位静歩行は支持脚対角線の交点と重心鉛直投影点が一致していなければならないため、重心投影点  $G_\gamma$  のシフトに応じて脚基準位置  $c_i$  を求めなければならない。それぞれのシフト量は  $\Delta G_\gamma$  と  $\Delta c_i$  で表す。そこで、重心投影点のシフト量  $\Delta G_\gamma$  と脚基準位置  $c_i$  のシフト量  $\Delta c_i$  は必ずしも一致しないため、本研究では胴体の姿勢変化に応じて、次の条件を満たす任意の胴体姿勢を維持した傾斜面上の脚基準位置  $c_i$  を Fig.2.5 に示すアルゴリズムで求める。本論文で提案する脚基準位置は、傾斜面座標系  $\Sigma_\gamma$  上で考え、水平面における初期姿勢のような4脚支持状態での安定余裕をできるだけ従来通りの値にし、かつ最低限度のストロークは確保できるようにしたものである。

#### 脚基準位置 $c_i$ の決定条件

1.  $c_i$  が構成する  $D_i$  が点  $G_\gamma$  を通過すること、
2. 最小安定余裕  $S_{min}$  を保証すること、
3. 最小ストローク  $Stroke_{min}$  を設定し、これを必ず確保すること。

脚基準位置  $c_i$  の決定アルゴリズムに使用する変数を以下のように定義する.

$S_{hor}$  は傾斜面上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, Fig.2.4(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, 傾斜面上に作成するラインであり,  $\Sigma_\gamma$  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最小ストローク  $Stroke_{min}$  分だけ狭めた新しい脚可動範囲を表す.

$D_i$  は支持脚の対角線を表す.

$c_{ti}$  は仮脚基準位置を表し, 次の方法で設定する.

- (a) 仮脚基準位置  $c_{ti}$  を脚可動範囲  $R_i$  と安定余裕ライン  $S_{mi}$  との交点が構成する線分の中点とする.
- (b) もし, (a) の設定で脚基準位置  $c_i$  の決定条件 1. ( ページ 36 に示す決定条件 1. ) を満たさない場合, 条件を満たすまで対角の脚を等角度で移動する.

$Error$  は  $S_{min}$  が保証されなかったり指定した重心高さや胴体姿勢では  $c_i$  が存在しなかったりという意味をする. このとき, ロボットが歩行不可となり, 脚基準位置  $c_i$  の決定アルゴリズムが終了する.

次に脚基準位置  $c_i$  の決定アルゴリズムの流れについて詳細に述べる.

- (1)  $S_{hor}$  の値を従来における水平面歩行と同様の値に設定し, Fig.2.4(b) のように安定余裕ラインを作る.
- (2) 安定余裕ライン  $S_{mi}$  が脚可動範囲  $R_i$  内に存在するかを検証する. 存在する場合は ( 3 ), 存在しない場合は ( 7 ) の処理に移る.
- (3) Fig.2.4(b) に示すように安定余裕ライン  $S_{mi}$  と最小ストロークだけ狭められた脚可動範囲  $R_i$  とで作られる線分の中点を仮の脚基準位置  $c_{ti}$  とする. 仮脚基準位置  $c_{ti}$  を脚可動範囲  $R_i$  と安定余裕ライン  $S_{mi}$  との交点が構成する線分の中点とする.
- (4) 傾斜面座標系  $\Sigma_\gamma$  の原点  $G_\gamma$  から仮の脚基準位置に直線を引いた時, 対角にある脚 ( 脚 1 と 3, 脚 2 と 4 ) において一直線になっているかどうかを検証する. 一直線の場合は ( 8 ), なっていない場合は ( 5 ) の処理に移る.
- (5) 対角の脚と座標系  $\Sigma_\gamma$  の原点が一直線になるように, Fig.2.4(b) のように対角の脚を等角度移動し, 安定余裕ラインとの交点を求め, それを仮の脚基準位置とする. 具体的に, Fig.2.4(b) に示すように, まず, (a) で設定した  $c_{ti}$  と原点  $G_\gamma$  を構成する線分の角度  $\theta_i$  を

$$\theta_i = \text{atan2}(c_{tiy}, c_{tix}) \quad (i = 1 \sim 4) \quad (2.4)$$

のように求める．次に，対角脚の  $c_{ti}$  と  $G_\gamma$  を構成する線分を原点回りに，等角  $\phi_i$  で回転し，回転後の支持脚対角線を  $D_i$  とする．角度  $\phi_i$  を次のように求める．ここで，対角脚  $i$  ( $i=1\sim 4$ ) が 1 と 3 の場合は  $j = 1$  であり，2 と 4 の場合は  $j = 2$  である．

$$\phi'_i = \frac{\pi - (|\theta_j| + |\theta_{j+2}|)}{2}, \quad j = \begin{cases} 1 & (i = 1, 3) \\ 2 & (i = 2, 4) \end{cases} \quad (2.5)$$

$$\phi_i = \begin{cases} \phi'_i & (\theta_i \geq 0) \\ -\phi'_i & (other) \end{cases} \quad (i = 1 \sim 4) \quad (2.6)$$

最後に  $D_i$  と  $S_{mi}$  との交点  $c_{ti}$  を求める．よって，脚基準位置  $c_i$  の決定条件 1．（ページ 36 に示す決定条件 1．）を満たせる  $c_{ti}$  が求められる．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にするのが望ましいからである．

- (6) (5) で求めた仮の脚基準位置が最小ストロークだけ狭められた脚可動範囲内にあるか検証し，ない場合は (7)，ある場合は (8) の処理に移る．以上に求められた仮脚基準位置  $c_{ti}$  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．
- (7)  $S_{hor}$  を減らし，新しい  $S_{hor}$  を用いて新しい安定余裕ライン  $S_{mi}$  を作成して (2) の処理に戻る．しかし， $S_{hor}$  が安定余裕の設定値が最低値を下回った場合は (9) の処理に移る．
- (8) 仮脚基準位置  $c_{ti}$  が  $R_i$  に存在する場合は，仮脚基準位置  $c_i$  を正式な脚基準位置  $c_{ti}$  に設定して歩容計画に移る．
- (9) 与えられた環境では歩行できないことを *Error* として伝え，アルゴリズムを終了する．

以上の設定によりクロール歩容と循環歩容を基づいた傾斜面における 4 脚ロボットの全方位静歩行を実現することが可能となり，積極的に重心高さや胴体姿勢の変更による移動速度と安定性の向上について検討できる．

## 2.3 傾斜面における基準歩容の計画

前節までに、ロボットの重心高さや胴体姿勢を任意に維持した状態での斜面全方位静歩行を実現するために、必要となる座標系の設定、脚可動範囲と可動領域及び斜面における脚基準位置の決定法について述べた。それらの設定によって、傾斜面における基準歩容の計画を行うことが可能となる。傾斜面上の歩容計画は、旋回中心位置より歩容を選択してから、脚可動範囲を基にして脚先端の位置と軌道を計画する。まず傾斜面座標系  $\Sigma_\gamma$  上で、水平面上の全方位静歩行手法を用いて脚位置を求め、それを胴体座標系  $\Sigma_\alpha$  に変換する。具体的に、歩容計画は次の手順で行われる。

1. 歩行速度と旋回角速度による旋回中心の算出
2. 旋回中心の位置による歩容の選択
3. 遊脚着地位置と支持脚終了位置の算出
4. 脚先端軌道の計画

本節ではその傾斜面における基準歩容の計画を旋回中心位置による歩容の選択、遊脚着地位置と支持脚終了位置の算出、脚先端軌道の計画の順でそれぞれを求める方法について述べる。

### 2.3.1 旋回中心位置の導出

水平面の全方位静歩行における基準歩容の概念図を Fig.2.6 に示す。このように水平面の全方位静歩行は任意の点回りの旋回により実現される。旋回中心を無限遠方にとれば並進となり、旋回中心を重心から離れたところにとれば旋回、胴体重心の真下にはその場の旋回と歩行が変化する。本研究では、操縦入力によりロボットに歩行速度と旋回角速度が与えられるものとする。よって、旋回中心  $Q$  の位置は操縦入力から与えられた歩行速度  $v_{in}$  と旋回角速度  $\dot{\theta}_{in}$  より求まる。重心の旋回半径  $r_g$  は

$$r_g = \frac{|v_{in}|}{|\dot{\theta}_{in}|} \quad (2.7)$$

となる。ただし、旋回角速度が 0 となる場合は、旋回角速度の大きさを 0 でない十分小さな値で代用するものとする。

胴体重心から見て旋回中心  $Q$  の位置は歩行速度の向きに対して常に直角であるから、旋回角速度が正の時に旋回中心が進行方向に対して左手に来るように旋回中心位置を与えると、次式のようになる。

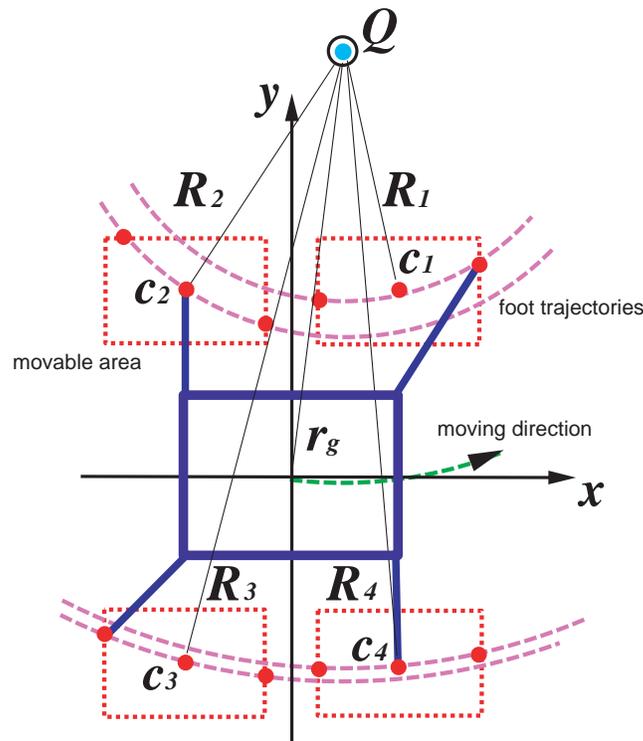


Figure 2.6: Foot trajectories, foot common position and parameters for standard circular gait

$$Q = \text{Rot}(k, \frac{\pi}{2}) \frac{v_{in}}{|v_{in}|} r_g \quad (2.8)$$

$$= \text{Rot}(k, \frac{\pi}{2}) \frac{v_{in}}{|\dot{\theta}_{in}|} \quad (2.9)$$

ここで  $\text{Rot}(k, \frac{\pi}{2})$  は  $Z$  軸回りに  $\pi/2$  だけ回転させる回転変換行列である。旋回角速度が負になった場合は旋回中心が進行方向に対して右手に来るように旋回中心位置を与える。それに式 (2.9) の回転変換を逆の方向に  $\pi/2$  だけ取る。このようにして求めた旋回中心位置は式 (2.9) の右辺に  $-1$  をかけたものとなるので、式 (2.9) を次式のようにすれば旋回角速度の正負によらず旋回中心位置を与えることができる。

$$Q = \text{Rot}(k, \frac{\pi}{2}) \frac{v_{in}}{\theta_{in}} \quad (2.10)$$

以上のように操縦入力で与えられた歩行速度と旋回角速度から旋回中心を求め、得られた旋回中心回りに静歩行を行う全方位歩行を実現する。

### 2.3.2 旋回中心位置による歩容の選択

全方位静歩行の歩行パターンはクロール歩容と循環歩容に分けられる．その選択は臨界側行角 [6] で区切られており，旋回中心位置がどの領域に来るかで決定される．クロール歩容とは爬虫類や両生類に見られる低速移動時の歩行である．常に3本以上の脚が接地して静的に安定であり，Fig.2.7のように，X型クロール，RX型クロール，Y型クロールとRY型クロールの4種類がある．循環歩容は遊脚が隣りの脚に順々に移行していく歩行で，その場の旋回に使われる．また旋回中心が重心に近い時は，クロール歩容より循環歩容の方が早く歩行できるため，この場合にも循環歩容が適用される．Fig.2.8のようにO型循環とRO型循環の2種類がある．

本研究の操縦入力は歩行速度と旋回角速度であり，式(2.7)，式(2.9)により旋回半径と旋回中心位置を求められる，求めた旋回中心位置から歩容を選択する．本研究では旋回中心位置と回転方向をFig.2.9に当てはめ，相当する歩容をFig.2.7，Fig.2.8から選択する．この図はクロール歩容と循環歩容を使い分ける境界線が不明確であるため，循環歩容を用いた場合の安定余裕が0になる境界線を求めたものである．使用する例として，ロボットが反時計方向に旋回する場合，旋回中心の位置がFig.2.9に示す(5)の領域にあるとき，Fig.2.8(2)のO型循環歩容を選択することになる．

### 2.3.3 遊脚着地位置と支持脚終了位置

入力は4脚ロボットの速度と旋回角速度であり，これは胴体座標系 $\Sigma_\alpha$ 上に与えられる．この時4脚ロボットの移動軌跡は旋回中心位置 $Q$ を中心とした円となる．歩容計画では4脚ロボットの軌道が用いられるため，円軌道を傾斜面に投影しなければならない．傾斜面に投影された軌道は楕円軌道となり，この楕円軌道を用いて傾斜面上で歩容計画を行う．

#### 傾斜面における支持脚軌道

従来の胴体姿勢を水平に維持した状態での斜面全方位歩行でも楕円軌道が用いられていた．しかし，従来と本論文の相違点がある．それは従来では長軸 $s_i$ と短軸 $m_i$ が傾斜面座標系 $\Sigma_\gamma$ のX,Y軸と一致していたが，胴体が任意に傾斜するため従来のように一致しない場合が存在することである．よって，その長軸と座標系 $\Sigma_\gamma$ とのずれを表す角度 $\theta_{el}$ も考慮しなければならない．

座標系 $\Sigma_\gamma$ で求められた傾斜面の脚可動範囲と旋回中心 ${}^\gamma Q$ から実行可能な最大旋回角速度を算出する．そのためにFig.2.11に示す $\theta_{fi}, \theta_{ri}$ を求める．

それぞれの脚基準位置 ${}^\gamma C_i$ を旋回中心 ${}^\gamma Q$ からみた偏角で表す．長軸 $s_i$ と短軸

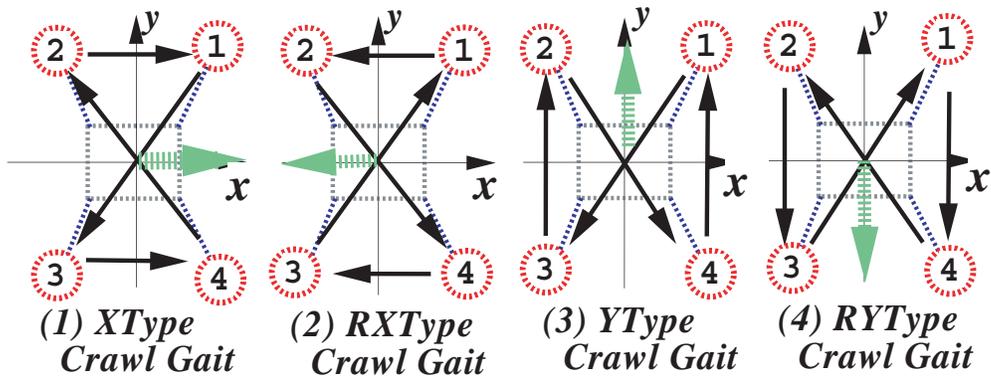


Figure 2.7: Type of the crawl gait

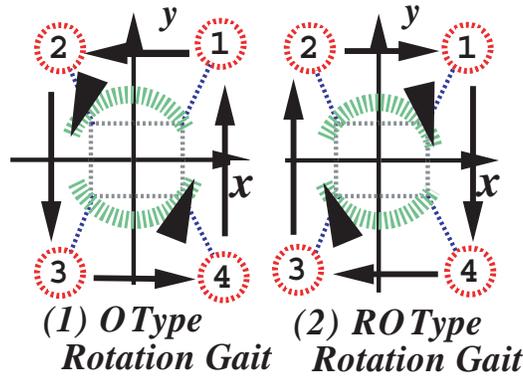


Figure 2.8: Type of the rotation gait

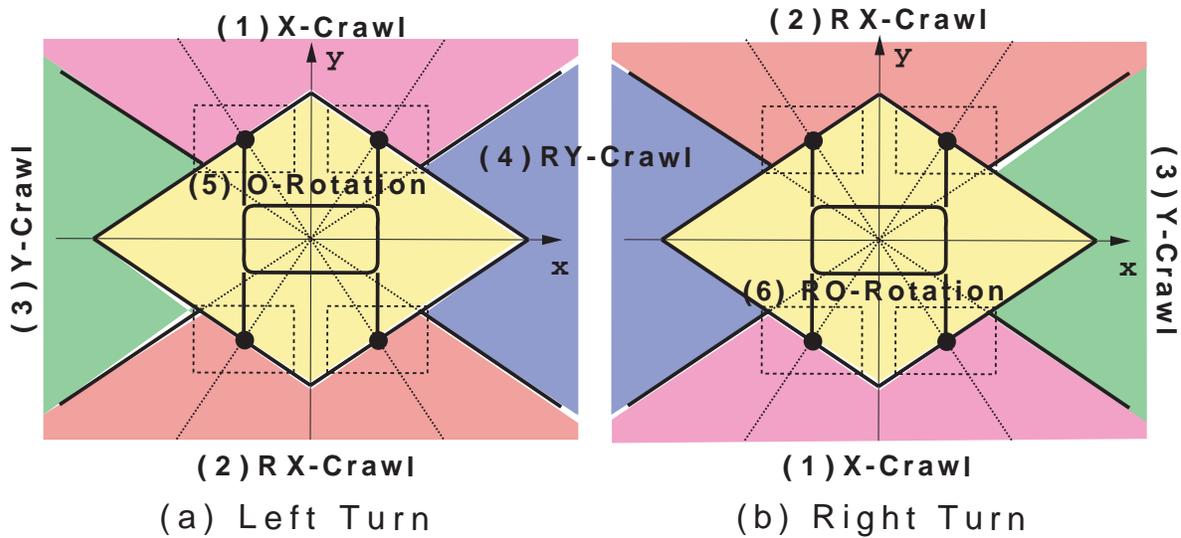


Figure 2.9: Gait selection by center of curvature

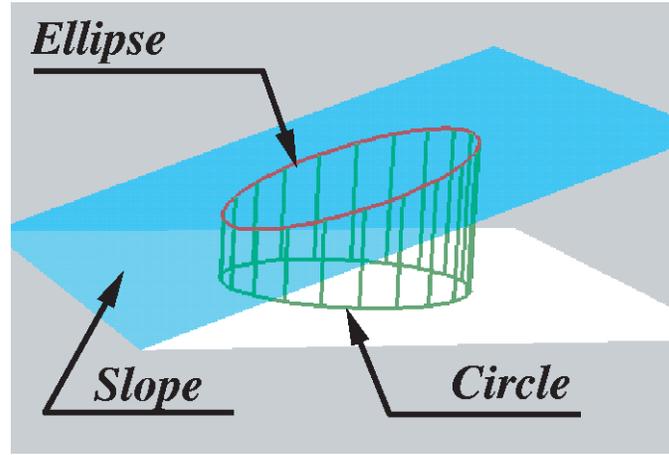


Figure 2.10: Ellipse course on slope

$m_i$  を用いると

$$\phi_{ci} = \text{atan2}(s_i(\gamma C_{iy} - \gamma Q_y), (m_i(\gamma C_{ix} - \gamma Q_x))) \quad (2.11)$$

のように表すことができる. また, 支持脚が描く円弧の軌道とその脚の可動範囲との交点のうち, 進行方向にあるものを  $\gamma P_{fi}$ , その反対方向にあるものを  $\gamma P_{ri}$  とするとその偏角はそれぞれ,

$$\phi_{fi} = \text{atan2}(s_i(\gamma P_{fiy} - \gamma Q_y), (m_i(\gamma P_{fix} - \gamma Q_x))) \quad (2.12)$$

$$\phi_{ri} = \text{atan2}(s_i(\gamma P_{riy} - \gamma Q_y), (m_i(\gamma P_{rix} - \gamma Q_x))) \quad (2.13)$$

のように求めることができる.

これらの  $\phi_{ci}, \phi_{fi}, \phi_{ri}$  に対して軌道分割係数  $K_{qfi}, K_{qri}$  を用い,  $\theta_{fi}, \theta_{ri}$  を求めると次のようになる. 軌道分割係数は歩容によってかわり, Table.2.1 に示すような値をとる.

$$\theta_{fi} = \frac{|\phi_{fi} - \phi_{ci}|}{K_{qfi}} \quad (2.14)$$

$$\theta_{ri} = \frac{|\phi_{ri} - \phi_{ci}|}{K_{qri}} \quad (2.15)$$

全ての脚の  $\theta_{fi}, \theta_{ri}$  のうち, 最も小さいものを 1 周期当りの最大旋回角度  $\theta_{max}$  とし, これを 1 周期の時間  $t_c$  で割ったものを最大旋回角速度  $\dot{\theta}_{max}$  とする.

$$\theta_{max} = \min\{\theta_{fi}, \theta_{ri} : i = 1, 2, 3, 4\} \quad (2.16)$$

$$\dot{\theta}_{max} = \frac{\theta_{max}}{t_c} \quad (2.17)$$

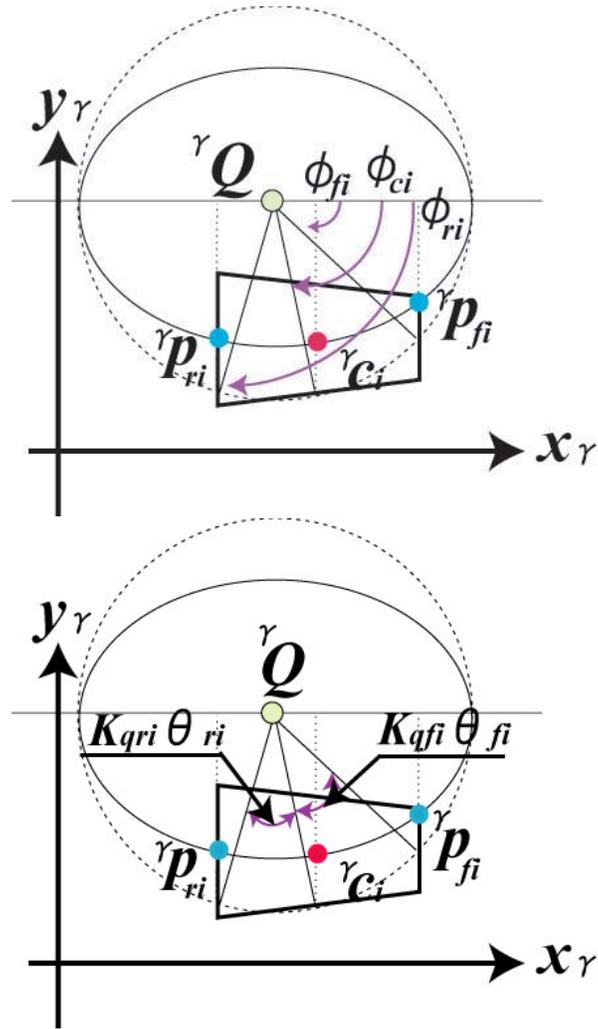


Figure 2.11: Reachable angles of a leg around curvature center

## 脚軌道分割係数

脚軌道分割係数は、脚可動範囲内にある支持脚の軌道長を脚基準位置の前後で分割する係数である。例えば、X型クローラの場合、第1脚、第4脚（前脚）においては可動範囲中の軌道長のうち、脚基準位置より前では全体の半分（0.5）と脚基準位置より後では全体の4分の1（0.25）しか使用しないということを意味する。脚可動範囲内の支持脚軌道を限界まで使用したほうが歩行速度の上限を高くとることが出来る。しかし、そうすると進行方向や旋回中心が変わって歩容が変化した場合に、歩容遷移の前後で共通な脚配置をとることができなくなる。

全方位静歩行を行う際に、次の理由で脚可動範囲の3/4しか使用しないように設定していた。

- (1) 連続的な歩容遷移を実現するために、歩容遷移前後で共通の脚基準位置の設定が必要である。対脚の脚基準位置を結ぶラインが重心投影点を通過しな

Table 2.1: Partition coefficient for each walking pattern

| <i>X-crawl</i> |             |             | <i>RX-crawl</i> |             |             |
|----------------|-------------|-------------|-----------------|-------------|-------------|
| <i>leg i</i>   | <i>Kgfi</i> | <i>Kgri</i> | <i>leg i</i>    | <i>Kgfi</i> | <i>Kgri</i> |
| 1              | 0.5         | 0.25        | 1               | 0.25        | 0.5         |
| 2              | 0.25        | 0.5         | 2               | 0.5         | 0.25        |
| 3              | 0.25        | 0.5         | 3               | 0.5         | 0.25        |
| 4              | 0.5         | 0.25        | 4               | 0.25        | 0.5         |

| <i>Y-crawl</i> |             |             | <i>RX-crawl</i> |             |             |
|----------------|-------------|-------------|-----------------|-------------|-------------|
| <i>leg i</i>   | <i>Kgfi</i> | <i>Kgri</i> | <i>leg i</i>    | <i>Kgfi</i> | <i>Kgri</i> |
| 1              | 0.5         | 0.25        | 1               | 0.25        | 0.5         |
| 2              | 0.5         | 0.25        | 2               | 0.25        | 0.5         |
| 3              | 0.25        | 0.5         | 3               | 0.5         | 0.25        |
| 4              | 0.25        | 0.5         | 4               | 0.5         | 0.25        |

| <i>O(RO)-rotation</i> |             |             |
|-----------------------|-------------|-------------|
| <i>leg i</i>          | <i>Kgfi</i> | <i>Kgri</i> |
| 1,2,3,4               | 0.5         | 0.25        |

ければならない。

- (2)  $\beta=0.75$  のクローल歩容では、安定性を確保するため、DTE点(10ページ: 支持脚三角形が切り替わる脚位置のこと)に通過する際に、対脚となる脚の脚位置が必ず脚基準位置に乗らなければならない。
- (3) クローल歩容と循環歩容とも周期性のある歩容である。X型クロールの場合、遊脚順序は1-2-4-3である。各脚が遊脚開始時点に到達するまでの位相はそれぞれ $1/4$ 周期遅れている(0-0.25-0.5-0.75)。前脚が遊脚となる時に、次の遊脚となる対角脚(支持脚)が $1/4$ 周期分の移動量を確保しなければならない。

以上のことによって、進行方向に対して前脚が脚可動範囲の前部分の $3/4$ 、後脚が脚可動範囲の後部分の $3/4$ を使用する。そこで、歩容遷移の前後で共通な脚配置をとるような支持脚軌道を求めるために、脚軌道分割係数  $K_{qfi}$  と  $K_{gri}$  を導入する。Fig.2.11 に示すように、支持脚が可動範囲内に描く円弧軌道を歩容に応じて分割する係数であり、歩容に応じて Table.2.1 に示す値をそれぞれ用いる。この軌道分割係数を用いることで歩容を遷移させるときに、より少ない歩数で遷移を完了することが可能となる。

## 遊脚着地位置

次に傾斜面の遊脚開始位置  ${}^{\gamma}P_{ei}$  , 支持脚終了位置  ${}^{\gamma}P_{hi}$  を算出し , その値を座標系  $\Sigma_{\alpha}$  の値に変換する .

遊脚開始位置  ${}^{\gamma}P_{ei}$  は  $t_i=0$  における脚先端位置であり , 遊脚着地位置の偏角  $\phi_{ei}$  は  $\phi_{ci}$  ,  $K_{qi}$  ( $K_{qfi}$  または  $K_{qri}$ ) , 1 周期当りの旋回角度  $\theta$  ( $\theta = \dot{\theta}t_c$  . ただし  $\theta \leq \theta_{max}$ ) を用いて

$$\begin{aligned}\phi_{ei} &= \phi_{ci} + K_{qi}\theta \\ \phi_{Ei} &= \text{atan2}(s_i(\sin(\phi_{ei})), (m_i(\cos(\psi_{ei}))))\end{aligned}\quad (2.18)$$

と表せる . ここで  $K_{qi}$  は式 (2.14) , 式 (2.15) , 式 (2.16) から  $\theta_{max}$  を求めたときに  $\min\{\theta_{fi}, \theta_{ri}\}$  となる  $\theta_{fi}$  (または  $\theta_{ri}$ ) をつくる軌道分割係数である . よって , 式 (2.18) と長軸と座標系  $\Sigma_{\gamma}$  とのずれを表す角度  $\theta_{el}$  を用いることで遊脚着地位置  ${}^{\gamma}P_{ei}$  が求まり , それを座標系  $\Sigma_{\alpha}$  の値に変換する .

$$\begin{aligned}{}^{\gamma}P_{ei} &= {}^{\gamma}Q + \begin{bmatrix} s_i \cos(\phi_{Ei} + \theta_{el}) \\ m_i \sin(\phi_{Ei} + \theta_{el}) \\ 0 \end{bmatrix} \\ {}^{\alpha}P_{ei} &= {}^{\alpha}T_{\gamma} {}^{\gamma}P_{ei}\end{aligned}\quad (2.19)$$

## 支持脚終了位置

支持脚終了位置  ${}^{\gamma}P_{hi}$  は  $t_i=t_c$  における脚先端位置である . 支持脚終了位置の偏角  $\phi_{hi}$  は , 遊脚終了時刻  $t_{sw}$  , 遊脚着地位置 の偏角  $\phi_{ei}$  と旋回角速度  $\dot{\theta}$  ( $\dot{\theta}=\dot{\theta}_{in}$  . ただし ,  $\dot{\theta} \leq \dot{\theta}_{max}$ ) を用いて ,

$$\begin{aligned}\phi_{hi} &= \phi_{ei} - \dot{\theta}(t_c - t_{sw}) \\ \phi_{Hi} &= \text{atan2}(s_i(\sin(\phi_{hi})), (m_i(\cos(\psi_{hi}))))\end{aligned}\quad (2.20)$$

と表されるので , 支持脚終了位置  ${}^{\gamma}P_{hi}$  は次のように求まる . それを座標系  $\Sigma_{\alpha}$  の値に変換する .

$$\begin{aligned}{}^{\gamma}P_{hi} &= {}^{\gamma}Q + \begin{bmatrix} s_i \cos(\phi_{Hi} + \theta_{el}) \\ m_i \sin(\phi_{Hi} + \theta_{el}) \\ 0 \end{bmatrix} \\ {}^{\alpha}P_{hi} &= {}^{\alpha}T_{\gamma} {}^{\gamma}P_{hi}\end{aligned}\quad (2.21)$$

## 2.3.4 脚先端軌道の計画

次に基準歩容で歩行するために必要な遊脚と支持脚の先端軌道の計画を行う。遊脚軌道は開始位置  $P_{si}$  と終了位置  $P_{ei}$  とを結んだ曲線のことであり、本研究では  $\cos$  関数曲線を用いて

$${}^{\alpha}P_{di} = \begin{bmatrix} \frac{{}^{\alpha}P_{six} - {}^{\alpha}P_{eix}}{2} \cos\left(\frac{\pi}{t_{sw}}t_i\right) \\ \frac{{}^{\alpha}P_{siy} - {}^{\alpha}P_{eiy}}{2} \cos\left(\frac{\pi}{t_{sw}}t_i\right) \\ \frac{h_{sw}}{2} \left\{ 1 - \cos\left(\frac{2\pi}{t_{sw}}t_i\right) + \frac{{}^{\alpha}P_{siz} - {}^{\alpha}P_{eiz}}{2} \cos\left(\frac{\pi}{t_{sw}}t_i\right) \right\} \end{bmatrix} + \frac{1}{2}({}^{\alpha}P_{si} + {}^{\alpha}P_{ei}) \quad (2.22)$$

$${}^{\alpha}\dot{P}_{di} = \begin{bmatrix} -\frac{{}^{\alpha}P_{six} - {}^{\alpha}P_{eix}}{2} \frac{\pi}{t_{sw}} \sin\left(\frac{\pi}{t_{sw}}t_i\right) \\ -\frac{{}^{\alpha}P_{siy} - {}^{\alpha}P_{eiy}}{2} \frac{\pi}{t_{sw}} \sin\left(\frac{\pi}{t_{sw}}t_i\right) \\ h_{sw} \left\{ \frac{\pi}{t_{sw}} \sin\left(\frac{2\pi}{t_{sw}}t_i\right) - \frac{{}^{\alpha}P_{siz} - {}^{\alpha}P_{eiz}}{2} \frac{\pi}{t_{sw}} \sin\left(\frac{\pi}{t_{sw}}t_i\right) \right\} \end{bmatrix} \quad (2.23)$$

のように指令位置  ${}^{\alpha}P_{di}$ 、指令速度  ${}^{\alpha}\dot{P}_{di}$  を与える。  $t_{sw}$  は遊脚時間である。支持脚軌道は円弧であるから、指令位置  ${}^{\gamma}P_{di}$  と指令速度  ${}^{\gamma}\dot{P}_{di}$  は偏角  $\phi_{di}$  を用いて座標系  $\Sigma_{\gamma}$  上の値を求め、座標系  $\Sigma_{\alpha}$  に変換する。

$$\begin{aligned} \phi_{di} &= \phi_{ei} - \dot{\theta}(t_i - t_{sw}) \\ \phi_{Di} &= \text{atan2}(s_i(\sin(\phi_{di})), (m_i \cos(\phi_{di}))) \end{aligned} \quad (2.24)$$

$${}^{\gamma}P_{di} = \begin{bmatrix} {}^{\gamma}Q_x + s_i \cos(\phi_{Di} + \theta_{el}) \\ {}^{\gamma}Q_y + m_i \sin(\phi_{Di} + \theta_{el}) \\ 0 \end{bmatrix}$$

$${}^{\alpha}P_{di} = {}^{\alpha}T_{\gamma} {}^{\gamma}P_{di} \quad (2.25)$$

$$\begin{aligned} {}^{\gamma}\dot{P}_{di} &= \begin{bmatrix} -s_i \sin(\phi_{di}) \dot{\phi}_{Di} \\ m_i \cos(\phi_{di}) \dot{\phi}_{Di} \\ 0 \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} s_i \sin(\phi_{Di}) \dot{\theta} \\ -m_i \cos(\phi_{Di}) \dot{\theta} \\ 0 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

$${}^{\alpha}\dot{P}_{di} = {}^{\alpha}\dot{T}_{\gamma} {}^{\gamma}P_{di} + {}^{\alpha}T_{\gamma} {}^{\gamma}\dot{P}_{di} \quad (2.26)$$

## 2.4 傾斜面における連続的な歩容遷移

全方位静歩行は連続的な歩容遷移により、停止することなく与えられた任意の方向に移動することが可能である。前節までに、歩容遷移を少ないステップで終了することを可能にするため、DTE点において支持脚対角線をなす2脚が歩容遷移前後に必ず共通の脚基準位置に来るように脚軌道を計画した。よって、歩容遷移の開始は歩行中の旋回中心位置が変更された時でDTE点の一手前から行うことになる。歩容遷移パターンはFig.2.7とFig.2.8に示す歩容間の遷移であり、次のように分類できる。

- クロール歩容から別のクロール歩容への歩容遷移
- クロール歩容から循環歩容への歩容遷移
- 循環歩容からクロール歩容への歩容遷移
- 循環歩容から循環歩容への歩容遷移

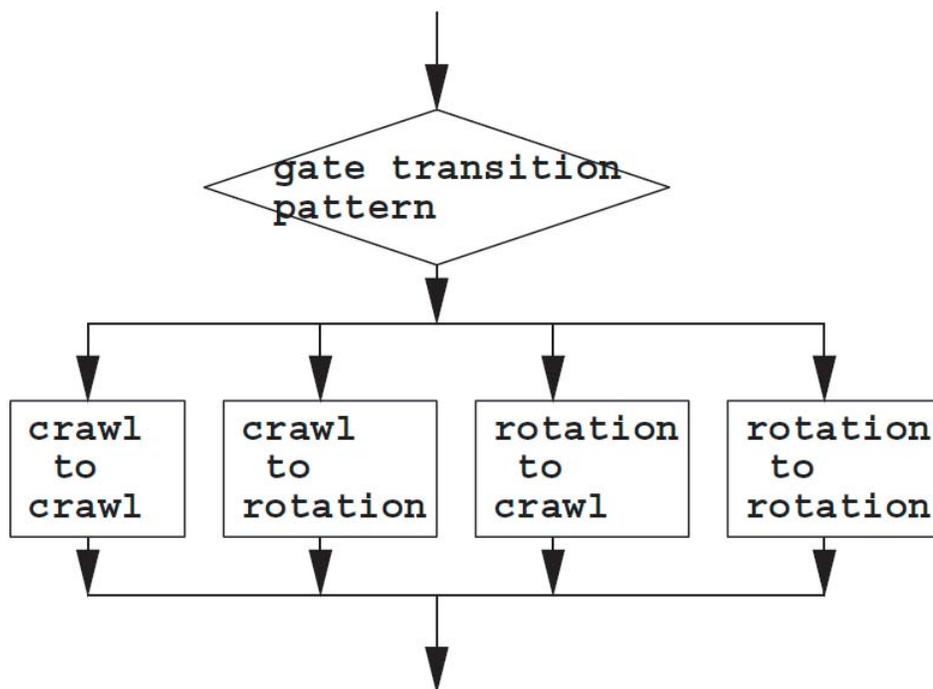


Figure 2.12: Follow chart of gait-transition all patterns

本節では、上記4つの遷移パターンを安定かつ連続に、ロボットの重心高さと胴体姿勢を任意に維持した歩容遷移の脚移動順序について詳細に述べる。フローチャートをFig.2.12に示す。

## 2.4.1 クロール歩容からクロール歩容への遷移

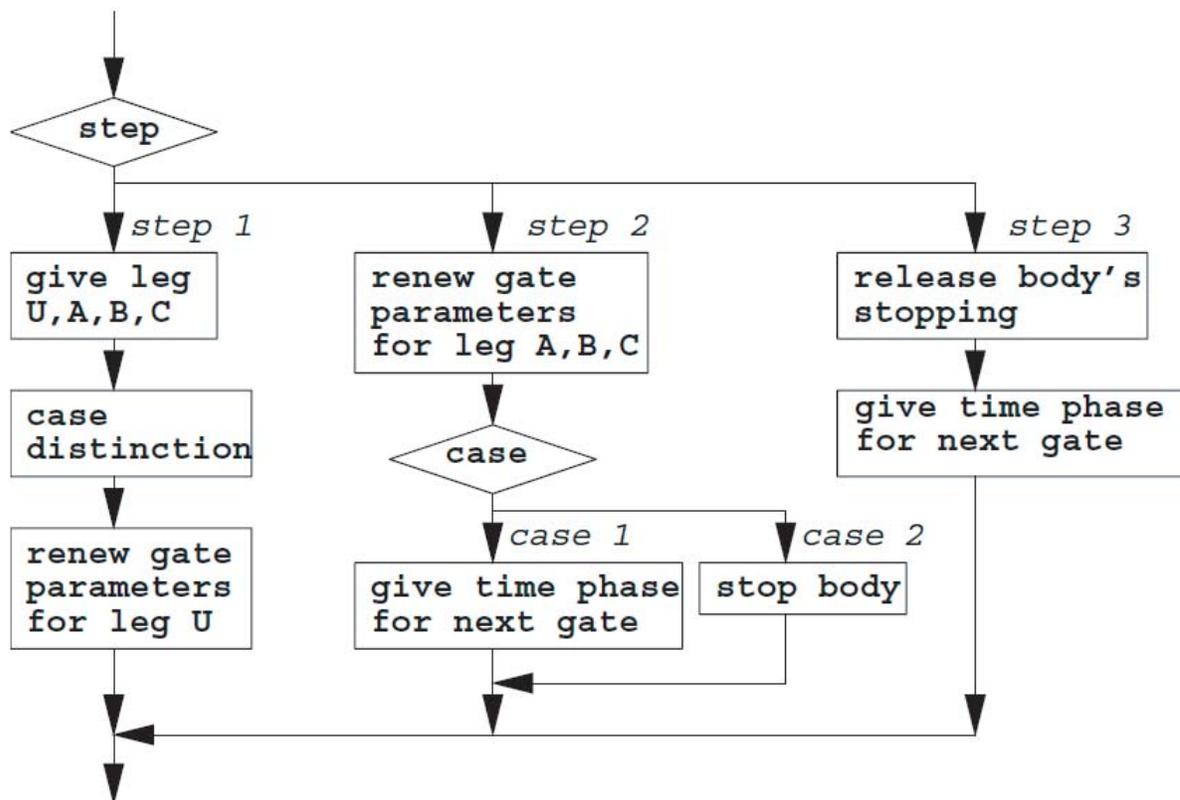


Figure 2.13: Follow chart of gait-transition from crawl gait to crawl gait (case 1, case 2)

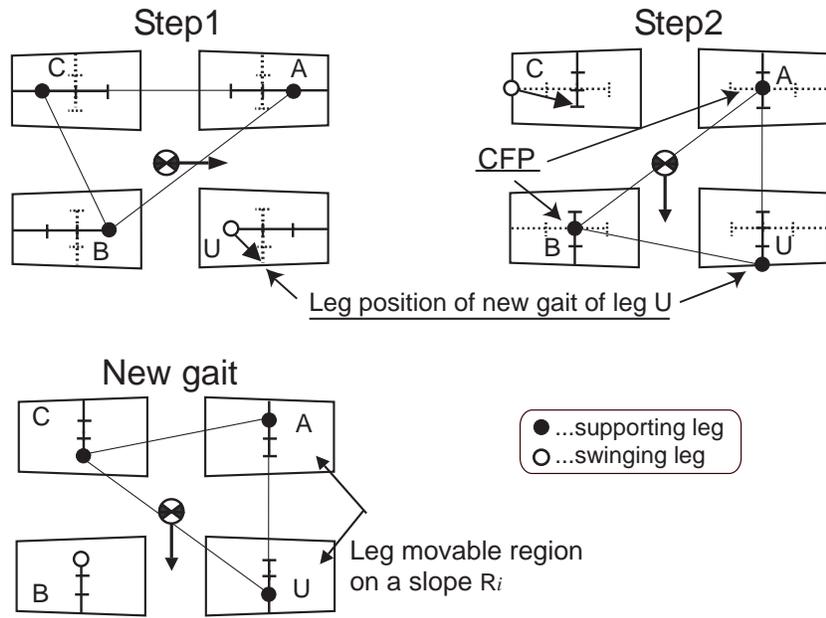
クロール歩容からクロール歩容への遷移は、歩容遷移開始時にどの脚が遊脚化するかにより、次の2つのケースに分られる。クロール歩容からクロール歩容への遷移のフローチャートを Fig.2.13 に示し、脚移動順序を Fig.2.14 に示す。

Case.1： 遷移一步目の遊脚が遷移後の進行方向に対して前脚となる場合

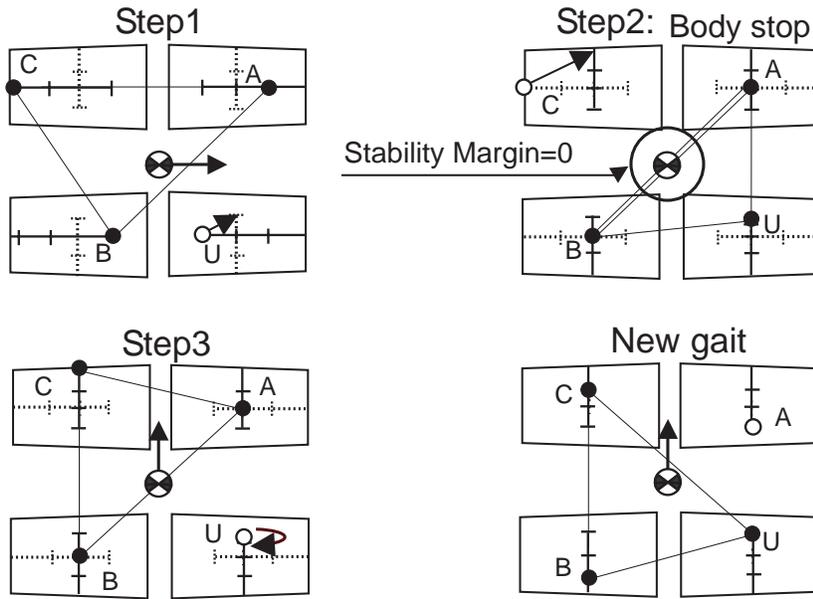
Case.2： 遷移一步目の遊脚が遷移後の進行方向に対して後脚となる場合

ここでUはStep 1で遊脚化する脚、Cは脚Uの対角にある脚、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は脚Aの対角にある脚を指す。

Step 1はDTE点の1歩手前の状態であり、1歩目の脚Uを次の歩容の脚位置に動かしながら遷移を開始する。Fig.2.14(a)のStep1が示しているとおり、重心は前の歩容の方向へ移動している。Step 1で次の歩容の脚位置に移るのは脚Uのみである。Step 2はDTE点であり、脚Aと脚Bが脚基準位置にあるため、この時点で脚Cを除く3脚とも次の歩容の脚位置に来ていることになる。また重心Gが脚



(a) Case 1



(b) Case 2

Figure 2.14: Gait-transition crawl gait to crawl gait (case 1, case 2)

## 2.4. 傾斜面における連続的な歩容遷移

---

A と B によって作られる対角線上に存在し，次に進行方向側に支持脚三角形が作られるため，脚 C が遊脚可能となり，次の歩容の脚位置に着地した時点で歩容遷移が完了する．Case 1, Case 2 とも上記のように歩容遷移を行う．ここで，Case 2 の場合は Fig.2.14(b) に示すとおり Step 2 で次の歩容の進行方向に支持脚三角形が形成されないため，胴体を遊脚一回分一時停止し，脚 C の遊脚運動のみ行う．そして進行方向側に支持脚三角形が形成されたら胴体の移動を再開する．

## 2.4.2 クロール歩容から循環歩容への遷移

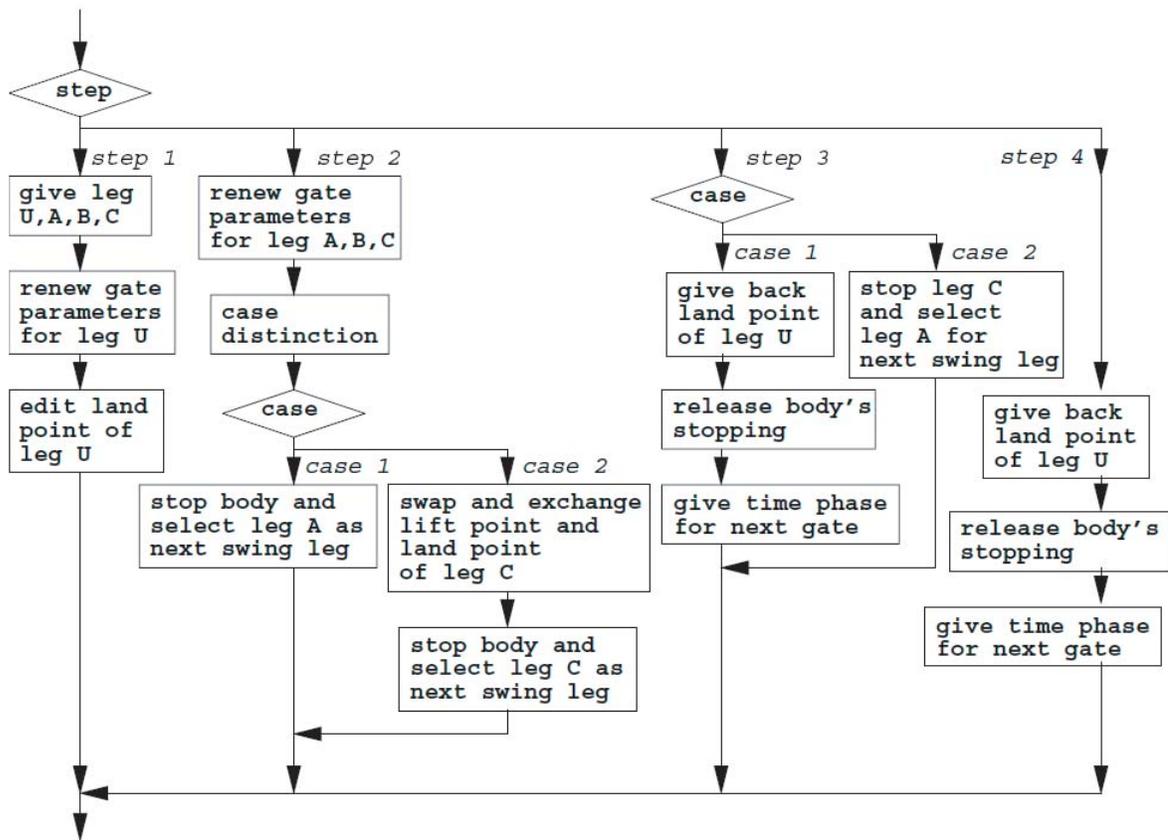


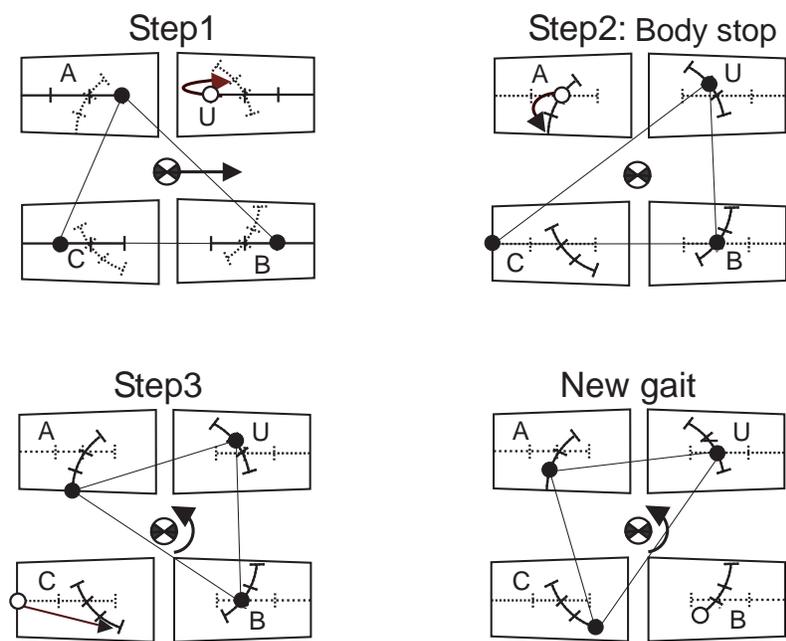
Figure 2.15: Follow chart of gait-transition from crawl gait to rotation gait ( case 1, case 2 )

クロール歩容から循環歩容への遷移は遷移2歩目の脚配置により、2つのケースに分られる。ここで脚UはStep1で遊脚化する脚、脚Cは脚Uの対角にある脚、脚Aは遷移後の遊脚順序が脚Uの次になる脚、脚Bは脚Aの対角にある脚を指す。歩容遷移のフローチャートを Fig.2.15 に示し、脚移動順序を Fig.2.16 に示す。

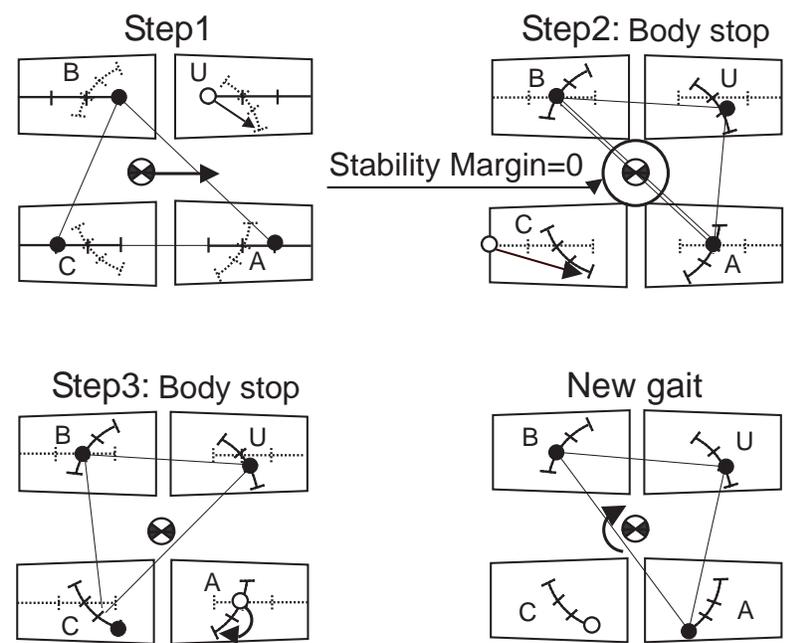
Step1はDTE点の1歩手前であり、クロール歩容からクロール歩容への遷移と同様、1歩目の脚Uを次の歩容の脚位置に動かす。クロール歩容から循環歩容への遷移においても胴体は前の歩容の方向に移動しており、脚Uのみが移動する。

クロール歩容から循環歩容への遷移はStep2において脚Aが遊脚化可能であるかどうかによって場合分けされる。

Case 1: Fig.2.16(a) に示すように、Step2で脚Aが遊脚化可能な場合は脚Aを遊脚化して次の歩容の脚位置へ動かす。しかし、Step2では脚Cの旋回分の脚可動範囲が保証されないため、胴体は遊脚一回分だけ一時停止させ、脚Aのみ遊脚運動を行う。また脚Bはこの時点で脚基準位置にあるため、すでに次の歩容の脚



(a) Case 1



(b) Case 2

Figure 2.16: Gait-transition from crawl gait to rotation gait ( case 1, case 2 )

位置にあるものと見なす．Step 3 で脚 C を次の歩容の脚位置に動かし，歩容遷移が完了する．

Case 2： Fig.2.16(b) に示すように Step 2 で脚 A が遊脚化できない場合は，脚 C を遊脚化して次の歩容の脚の終端位置に動かす．Case 2 の Step 2 では重心が支持脚対角線 AB 上に乗っており，脚 C が遊脚化可能である．Step 3 では脚 A が遊脚化可能となり，脚 A を次の歩容の脚位置に移動する．脚 B は Case 1 と同様，Step 2 で脚基準位置にあるので，次の歩容の脚位置にあるものと見なす．ここで脚 C を支持脚の終点位置に移動しているため，脚 C は旋回分の可動範囲が保証されていない．そのため，Case 2 では胴体を Step 2 と Step 3 で 2 回停止することが必要となる．

### 2.4.3 循環歩容からクロール歩容への遷移

循環歩容からクロール歩容への遷移の場合、循環歩容のどのような脚位置からでも実行可能である。循環歩容からクロール歩容への遷移のフローチャートを Fig.2.17 に示し、脚移動順序を Fig.2.18 に示す。ここで、脚 U は Step 1 で遊脚化する脚。脚 C は脚 U の対角にある脚、脚 A は脚 U と脚 C 以外で遷移後の進行方向に対して前脚となる脚、脚 B は脚 A の対角にある脚を指す。

Step 1 では脚 U を遊脚化し、脚基準位置へ移動させて遷移を開始する。脚 U が脚基準位置に来ると脚 C も脚基準位置に来るので、Step 2 で辺 UC 上に重心 G が乗る。よって、脚 B と脚 A とともに遊脚化可能となる。ここで、胴体を遊脚時間 1 回分だけ停止してから脚 A を遊脚化する。脚 A を先に遊脚化する理由は、遷移後の進行方向に支持脚三角形を形成するためである。Step 3 では残った脚 B を遊脚化し、次の歩容の脚位置へ移動することで歩容遷移が完了する。

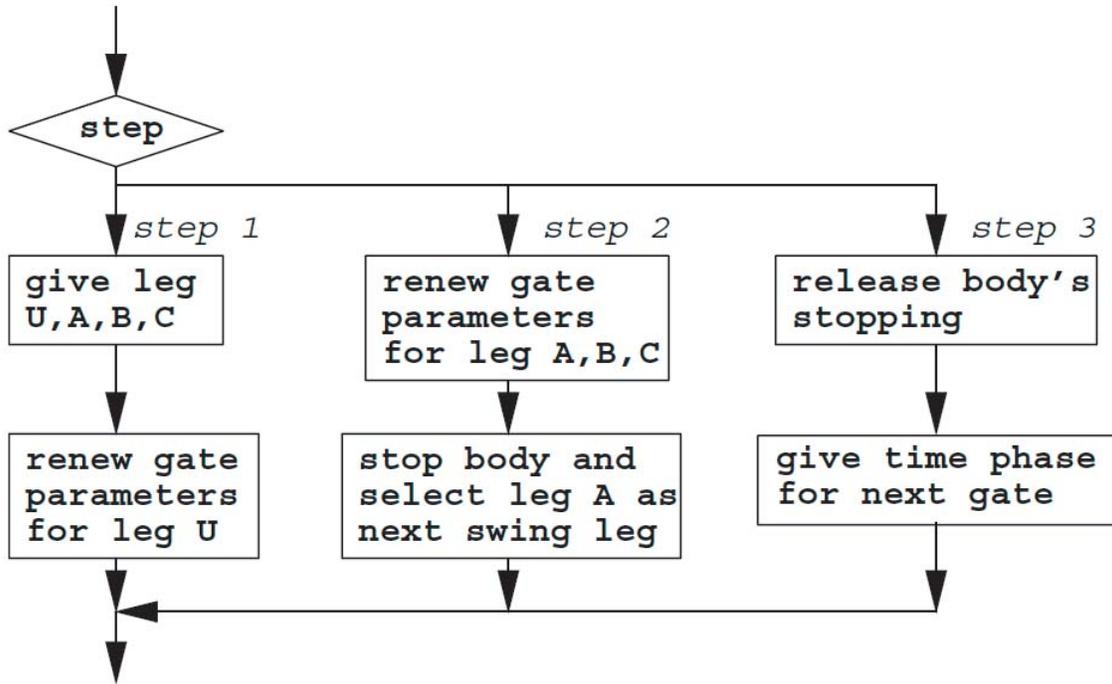


Figure 2.17: Follow chart of gait-transition from rotation gait to crawl gait

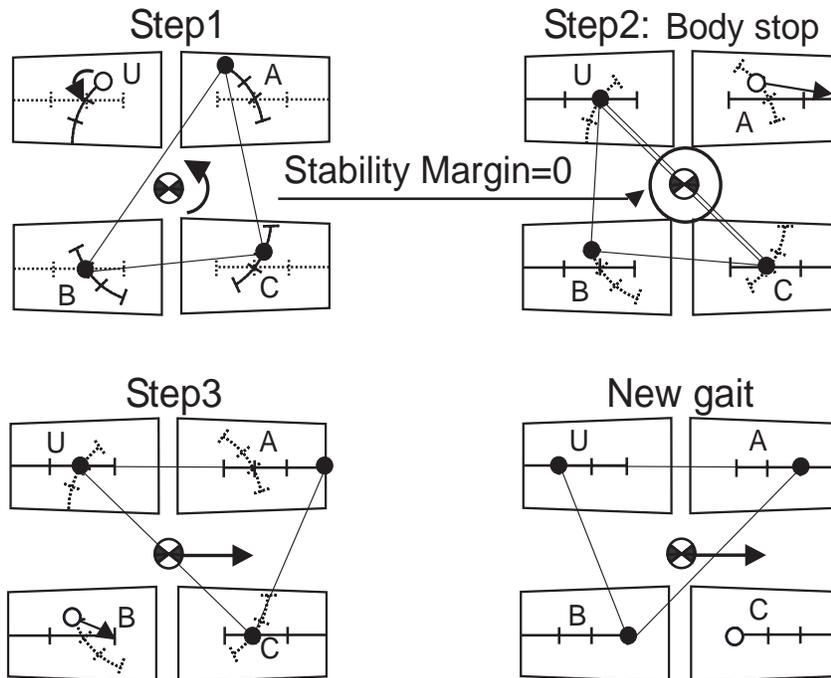


Figure 2.18: Gait-transition from rotation gait to crawl gait

2.4.4 循環歩容から循環歩容への遷移

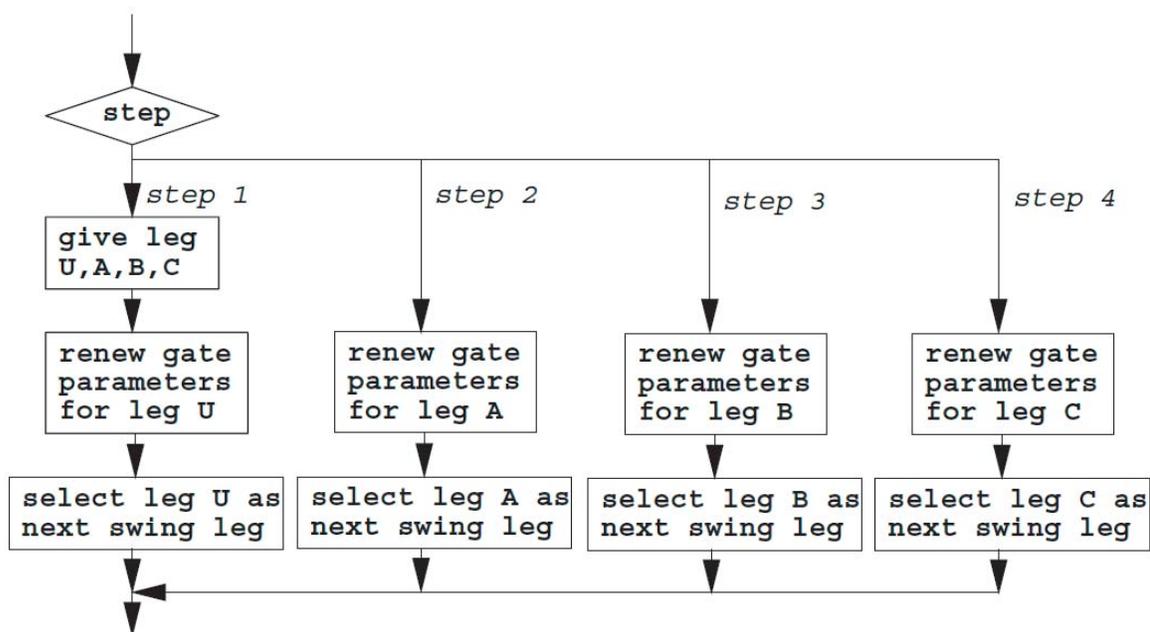


Figure 2.19: Follow chart of gait-transition from rotation gait to rotation gait

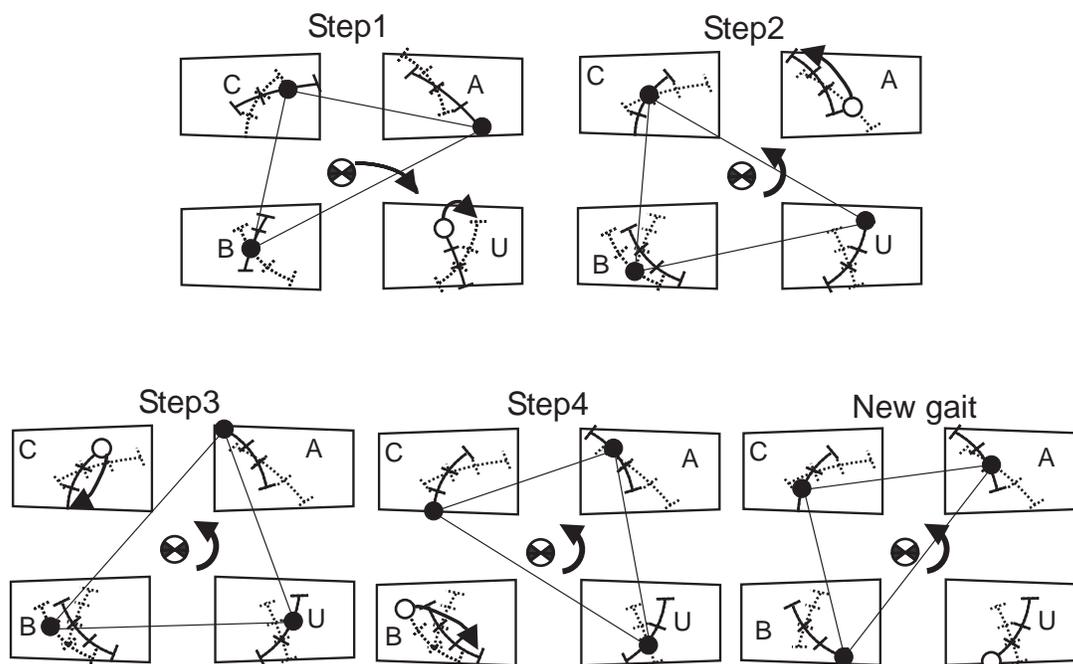
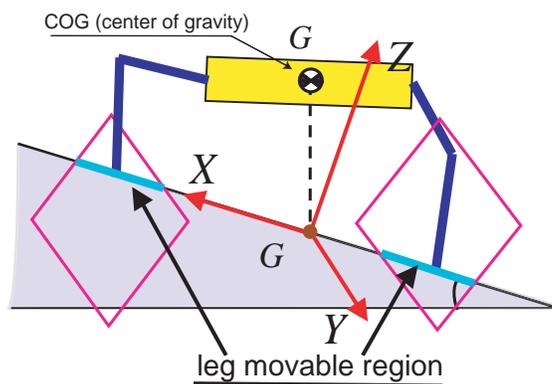


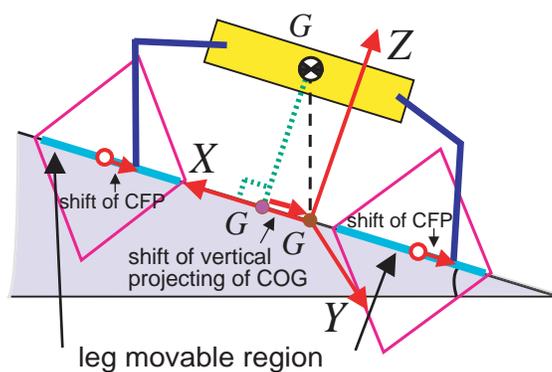
Figure 2.20: Gait-transition from rotation gait to rotation gait

循環歩容から循環歩容への遷移は循環歩容からクロール歩容への遷移と同様，どのような脚配置からでも実行可能である．循環歩容から循環歩容への遷移のフローチャートを Fig.2.19 に示し，脚移動順序を Fig.2.20 に示す．ここで，脚 U は Step 1 で遊脚化する脚，脚 C は脚 U の対角にある脚，A は遷移後の遊脚順序が脚 U の次になる脚，脚 B は脚 A の対角となる脚を指す．循環歩容から循環歩容への遷移では，遷移後の遊脚順序に従って脚を遷移後の脚位置に順に動かしていけば歩容遷移が完了する．

## 2.5 胴体姿勢による移動速度への影響



(a) Flat body on slope



(b) Parallel body on slope

Figure 2.21: The relation of a trade-off between leg movable region and body posture

前節までに、水平面の全方位静歩行手法を傾斜面へ拡張し、ロボットの胴体を Roll, Pitch, Yaw の3軸回りに任意に回転させ、重心高さを任意に維持した状態での斜面全方位静歩行を実現する方法について述べた。

斜面全方位静歩行を行う際に、ロボットの移動速度が明らかに低下してしまうという問題がある。まず、Fig.2.21(a)に示すように胴体を水平に保ったままでの傾斜面上の歩行について検討する。胴体水平の場合、搬送作業などには有利であるものの、傾斜面の傾斜角が大きくなると脚可動範囲が小さくなり、移動速度が著しく低下してしまうという問題がある。

次に、この問題を解決するため、可動範囲が最も大きく取れる、胴体を傾斜面と平行にした状態での歩行について検討する。Fig.2.21(b)に示すような姿勢では、

ロボットの重心鉛直投影点がロボットの真下ではなく、後方にずれてしまう。全方位静歩行は停止状態からでもあらゆる方向へ移動できるように設計されているため、重心鉛直投影点とロボットの支持脚対角線の交点は一致しなければならない。このような脚配置であれば停止状態からどの脚を遊脚化しても、支持脚三角形の辺上に重心鉛直投影点がのるため安定性を維持することができる。傾斜面と平行にした姿勢ならば水平面とほぼ同じ大きさの脚可動範囲を得る事ができる。しかし、この場合は連続的な歩容遷移を行うために設定した脚基準位置を胴体傾斜に応じてシフトさせる必要があるため、傾斜面の傾斜角に応じて脚基準位置のシフト量が大きくなり、使用可能な脚可動範囲が結果的に狭くなってしまう。即ち、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。また、第5.1節のシミュレーション実験によって、4脚ロボットの移動速度について脚可動範囲と脚位置シフト量のトレードオフの関係にあることを考慮し、傾斜面上において移動速度を最大にする最適な胴体姿勢が存在することを検証する。

以上の検討により傾斜面の傾斜角と移動方向に応じてロボットの移動速度を最大にする最適な胴体姿勢が存在することが明らかになった。

## 2.6 おわりに

本章では4脚ロボットの対地適応性を向上させるため、その水平面上の全方位静歩行手法を傾斜面に拡張し、ロボットの胴体を Roll, Pitch, Yaw の3軸回りに任意に回転させ、重心高さを任意に維持した状態での斜面全方位静歩行を実現する方法について述べた。

また、4脚ロボットの移動速度は脚可動範囲と脚位置シフト量がトレードオフの関係について検討し、傾斜面上において移動速度を最大にする最適な胴体姿勢が存在することを明らかにした。

次章から傾斜面歩行環境に応じた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する。



# 第3章 最適な胴体姿勢を有する全方位静歩行

## 目次

---

|       |                              |    |
|-------|------------------------------|----|
| 3.1   | はじめに . . . . .               | 64 |
| 3.2   | 最適化問題 . . . . .              | 66 |
| 3.2.1 | 制約なし非線形最適化 . . . . .         | 66 |
| 3.2.2 | 問題の設定 . . . . .              | 66 |
| 3.3   | 最適な胴体姿勢の導出 . . . . .         | 69 |
| 3.3.1 | 移動方向指定のクロール歩容 . . . . .      | 69 |
| 3.3.2 | 任意方向のクロール歩容 . . . . .        | 71 |
| 3.3.3 | 循環歩容 . . . . .               | 73 |
| 3.4   | 最適な胴体姿勢を有する歩容遷移 . . . . .    | 74 |
| 3.4.1 | クロール歩容からクロール歩容への遷移 . . . . . | 76 |
| 3.4.2 | クロール歩容から循環歩容への遷移 . . . . .   | 78 |
| 3.4.3 | 循環歩容からクロール歩容への遷移 . . . . .   | 80 |
| 3.4.4 | 循環歩容から循環歩容への遷移 . . . . .     | 81 |
| 3.5   | おわりに . . . . .               | 82 |

---

### 3.1 はじめに

前章までに傾斜面上における4脚ロボットの全方位静歩行を実現するために、座標系の設定、傾斜面上の脚可動範囲、脚基準位置の導出方法について述べた。さらに、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っていることを検証した。これらのことによって、ロボットが積極的に胴体姿勢を変更することで移動速度の向上が可能となった。

本章では、傾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胴体姿勢の最適化問題を検討し、その最適な胴体姿勢を有しながら傾斜面上において連続的に歩容遷移を行う手法を提案する。そこで、本研究の傾斜面上における最適な胴体姿勢としては、クロール歩容に対して任意の移動方向及び指定された方向、循環歩容に対してその場の旋回について導出した移動速度を最大にする胴体姿勢である。これらの歩容を組み合わせることによって最適な胴体姿勢を有する全方位静歩行を実現することができる。従来の4脚ロボットの胴体姿勢を扱う手法としては、胴体の姿勢変更を考慮した軌道追従歩容(TFG) [44]などが提案されているものの、胴体の最適な姿勢を維持しながら全方位静歩行が実現されていなかった。

本章ではまず、勾配法を用いて非線形最適化問題となる最適な胴体姿勢の誘導法について述べる。

次に、傾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最適な胴体姿勢を誘導する。

最後に、その最適な胴体姿勢を有しながら傾斜面上において連続的に歩容遷移を行う手法を提案する。

そこで、最適な胴体姿勢を有しながら傾斜面上において全方位静歩行を実現するために、水平面上における全方位静歩行の実現手順(「基準歩容の計画」と「連続的な歩容遷移」)について次のように拡張する。具体的に、

基準歩容の計画： 傾斜面座標系において旋回中心位置より歩容を選択してから、脚可動範囲を基にして脚先端の位置と軌道を計画する。求めた各パラメータを胴体座標系へ変換する。

1. 旋回中心の位置から歩容を選択する。
2. 脚軌道と脚可動範囲の交点を求める。
3. 脚基準位置、脚軌道と脚可動範囲の交点の偏角を求める。
4. 実行可能な旋回角速度を算出する。
5. 脚可動範囲から遊脚の着地位置と支持脚の終了位置を求める。
6. 脚先端の軌道計画を行う。
7. 各パラメータを胴体座標系へ変換する。

連続的な歩容遷移： 旋回中心の変更に応じて最適な胴体姿勢を有しながら歩容を連続的に遷移させる．

1. 新しい歩行速度と旋回角速度が与えられた場合，旋回中心および旋回半径を更新する．
2. 新しい旋回中心の位置より次の歩容を選択する．
3. 新しい歩容に対して最適な胴体姿勢を導出する．
4. 導出した新しい胴体姿勢の脚可動範囲で脚位置を求める．
5. 現在の歩容の脚位置から新しい歩容の脚位置へ順次脚を動かしていく．
6. 新しい歩容の最適な胴体姿勢へ姿勢変更を行う．

の順で連続的に歩容遷移を行う．

ここで，本章で提案した最適な胴体姿勢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，導出した最適な胴体姿勢の結果をデータベースにし，傾斜面の傾斜角，ロボットの移動方向に対応する新しい歩容の最適な胴体姿勢（新しい胴体姿勢）をデータベースのデータより補間している．今後，実時間で最適な胴体姿勢の導出については，別途検討する予定である．

## 3.2 最適化問題

最適化問題とは一般に、ある状況において最善の決定を行うことであり、そのような問題は、与えられた制約条件のもとで、目的関数とよばれる望ましさを尺度を表す関数が最小または最大となるような決定変数の値を見つけ出すという数学モデルである。決定変数（変数）は複数個存在するので、それを  $n$  次元ベクトル  $\boldsymbol{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n)$  で表し、問題を次のように書く、

$$\begin{aligned} \text{目的関数 } f(\boldsymbol{x}) &\longrightarrow \min \\ \text{制約条件 } \boldsymbol{x} &\in S \end{aligned} \tag{3.1}$$

ここで、目的関数  $f(\boldsymbol{x})$  は  $S$  を含む適当な集合上で定義された実数値関数である。 $S$  はこの問題において変数  $\boldsymbol{x}$  がとることを許された値の集合であり、問題最適化の実行可能領域となる。

最適化問題は変数、目的関数、制約条件のタイプによって、いくつかの問題クラスに分類できる。まず変数に関しては、変数が連続的な実数値をとる連続的最適化問題と整数または  $0, 1$  のような離散値をとる離散的最適化問題に大別される。

連続的最適化問題は目的関数が線形で制約条件が線形方程式で表される線形計画問題と目的関数や制約条件が必ずしも線形とは限らない非線形計画問題に分かれる。

### 3.2.1 制約なし非線形最適化

胴体姿勢を任意に傾斜させた場合、多角形となる脚可動範囲が胴体姿勢の変化に応じて変化するため、胴体姿勢の最適化問題を定式化することが困難である。そのため、本研究では非線形最適化問題となる最適な胴体姿勢の誘導に勾配法 [55] [54] を用いる。勾配法は点  $\boldsymbol{x}$  における目的関数  $f(\boldsymbol{x})$  の勾配ベクトル  $\nabla f(\boldsymbol{x})$  を用いて目的関数を最小化、又は最大化する方法である。

### 3.2.2 問題の設定

Fig.2.2 に示したように、ロボットの胴体姿勢を任意に傾斜させた場合、又は重心高さを変更した場合は、多角形となる脚可動範囲  $R_i$  がそ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、その目的関数  $f(\boldsymbol{x})$  を次のように定義する。

本研究では、クロール歩容と循環歩容に基づく全方位静歩行を行うため、目的関数  $f(\boldsymbol{x})$  はクロール歩容に対して最大ストローク長、循環歩容に対して最大旋回角度とする。具体的に、クロール歩容では任意の移動方向及び指定された方向に分けられる。まず、任意方向のクロール歩容では、クロール歩容での任意方向への移動を考慮する。移動方向が指定されない場合、最適な胴体姿勢はロボットが

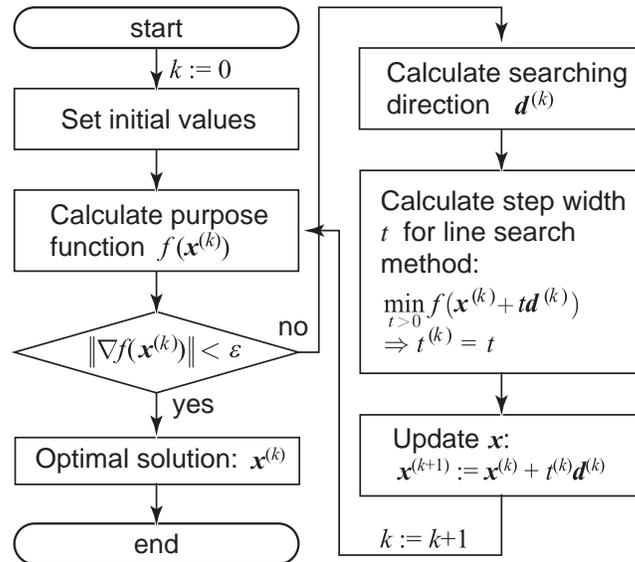


Figure 3.1: Algorithm of gradient method for optimal body posture

停止状態から任意の移動方向に対して，最大移動速度（最大ストローク長）が取れる重心高さとお体姿勢としている．即ち，全ての方向に対して4つの脚のうち，出し得るストローク長の最小値が最も大きく取れる姿勢が最適な重心高さとお体姿勢となる．そして，指定された方向のクロール歩容では，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お体姿勢を求める．さらに，循環歩容ではその場の旋回について最大旋回角速度が取れる重心高さとお体姿勢を求める．

傾斜面の傾斜角  $\psi$  とロボットの方向（Yaw角  $\psi_{bY}$ ）を入力項とし，目的関数を最大化する最適なお体姿勢を求める．変数  $x$  はロボットの Roll角と Pitch角からなる2次元実ベクトルであり， $x = (\psi_{bR}, \psi_{bP})^T$  で表す．本研究では，水平面における全方位静歩行と同様な安定余裕が維持できる（脚基準位置が存在する）ような全てのお体姿勢を検討対象とする．Fig.2.5 に示す脚基準位置の決定アルゴリズムの安定余裕に関するパラメータを次のように設定する．

$$S_M = S_{\min} = S_{\text{hor}} \quad (3.2)$$

勾配法による最適なお体姿勢の探索アルゴリズムを Fig.3.1 に示す．

Step1:初期化．式 (3.2) を満たし，脚基準位置が存在するようなお体姿勢を初期姿勢（初期値） $x^{(0)} \in R^2$  として選び， $k := 0$  とおく．

Step2:探索方向の計算．最急降下探索方向ベクトル  $d^{(k)}$  を式 (3.3) で計算する．十分小さい正の定数  $\varepsilon$  に対して式 (3.4) が成り立てば計算を終了し，求めた  $x$  を最適なお体姿勢とする．

$$d^{(k)} := -\nabla f(x^{(k)}) \quad (3.3)$$

$$\|\nabla f(\mathbf{x}^{(k)})\| < \varepsilon \quad (3.4)$$

$\|z\|$  はニュークリット・ノルム (Euclidean norm) である。  $n$  次元ベクトル  $z$  に対して,  $z$  の転置を  $z^T$  で表し,  $\sqrt{z^T z} = \sqrt{\sum_{i=1}^n z_i^2}$  で与えられる量をニュークリット・ノルムと呼ぶ。目的関数の勾配は

$$\nabla f(\mathbf{x}^{(k)}) = (\partial f(\mathbf{x}^{(k)})/\partial \psi_{bR}, \partial f(\mathbf{x}^{(k)})/\partial \psi_{bP})^T \quad (3.5)$$

で表し, 十分小さな  $(\Delta\psi_{bR}, \Delta\psi_{bP})$  に対して勾配を

$$\partial f(\mathbf{x}^{(k)})/\partial \psi_{bR} = (f(\mathbf{x}^{(k)} + (\Delta\psi_{bR}, 0)^T) - f(\mathbf{x}^{(k)}))/\Delta\psi_{bR} \quad (3.6)$$

$$\partial f(\mathbf{x}^{(k)})/\partial \psi_{bP} = (f(\mathbf{x}^{(k)} + (0, \Delta\psi_{bP})^T) - f(\mathbf{x}^{(k)}))/\Delta\psi_{bP} \quad (3.7)$$

のように近似的に求める。

Step3:直線探索。直線探索法を用いて1次元の最適化問題

$$\min_{t>0} f(\mathbf{x}^{(k)} + t\mathbf{d}^{(k)}) \quad (3.8)$$

を解く。1次元最適化問題を解いてステップ幅を定める。問題の最適解を正確に求めてステップ幅とすることを, 黄金分割法というような精密な直線探索法がある。しかし, 精密な直線探索では有限回の計算で問題の厳密解を求めることは一般に不可能である。そのため, 実際には問題に対する十分な精度の近似解が得られた時点でそれをステップ幅として採用する精密でない直線探索法を用いる。実際の計算では式(3.8)を解く代わりに, 式(3.9)の二つの不等式を同時に満たすような  $t > 0$  を一つ見つけて  $t^{(k)}$  とする方法を用いる。

$$\begin{cases} f(\mathbf{x}^{(k)} + t\mathbf{d}^{(k)}) \leq f(\mathbf{x}^{(k)}) + \beta t \nabla f(\mathbf{x}^{(k)})^T \mathbf{d}^{(k)} \\ (\nabla f(\mathbf{x}^{(k)} + t\mathbf{d}^{(k)})^T) \mathbf{d}^{(k)} \geq \gamma \nabla f(\mathbf{x}^{(k)})^T \mathbf{d}^{(k)} \end{cases} \quad (3.9)$$

ここで,  $\beta, \gamma$  は  $\beta \in (0, 1/2)$ ,  $\gamma \in (\beta, 1)$  を満たす定数である。  $\mathbf{x}^{(k+1)} := \mathbf{x}^{(k)} + t^{(k)} \mathbf{d}^{(k)}$  とし,  $k := k + 1$  において Step2 へ戻る。精密でない直線探索法を用いた結果, 精密な直線探索に比べて, 勾配法の反復回数が増加する場合もあるが, 1回の直線探索に要する計算の時間が少なく, 特に目的関数値の計算に大きな計算量が必要な問題に対しては全体の計算効率が上がっている。

### 3.3 最適な胴体姿勢の導出

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最適な胴体姿勢を求める．ロボットのモデルとしては実機 TITAN-VIII [15] の仕様を用いる．使用するパラメータを Table.3.1 に示す．ここで，胴体重心高さを  $H_{cog}=0.243[m]$  とし，Fig.2.2 に示す 8 面体となるロボットの脚可動領域を次のように設定する．8 面体の底面を  $0.30[m] \times 0.20[m]$  の長方形，胴体座標系  $\Sigma_\alpha$  の Z 軸正方向の高さを  $0.16[m]$ ，負方向の高さを  $0.14[m]$  とする．傾斜角  $\psi = 10[deg]$  を有する傾斜面において，ロボット胴体姿勢の変化に伴うストローク長と回転角度を検討する．但し，ロボットは対称的な機構であるため  $Yaw$  角の検討範囲は  $0[deg] \leq \psi_{bY} \leq 90[deg]$  とする．安定余裕は式 (3.2) を満たし， $S_{hor} = 0.2[m]$  とする．最小ストロークを  $Stroke_{min} = 0.001[m]$  と設定する．

Table 3.1: Robot model specifications and parameters for optimal body posture

|  |                          |
|--|--------------------------|
| Robot Size (standard posture) [mm]         | 400 (W)×600 (L)×250 (H)  |
| Leg movement area (basal plane) [mm]       | 300 (W)×200 (L)          |
| Leg movement area (height) [mm]            | 160 (Top), -140 (Bottom) |
| Height of COG ( $H_{cog}$ ) [m]            | 0.243                    |
| Inclination angle of slope( $\psi$ ) [deg] | 10.0                     |
| Initial $S_{hor}$ [m]                      | 0.2                      |
| Minimum stability margin ( $S_{min}$ ) [m] | 0.2                      |
| Minimum stroke ( $Stroke_{min}$ ) [m]      | 0.001                    |

#### 3.3.1 移動方向指定のクロール歩容

クロール歩容での指定方向への移動では，一定の移動方向に対して最大移動速度（最大ストローク長）が取れる姿勢を求める．具体的な例として，移動方向がロボットの方向の左前方  $30[deg]$  での X クロールについて検討する．

Fig.3.2 は傾斜面上，クロール歩容で指定した移動方向の最適な胴体姿勢を示す．図から分かるように，①Fig.3.2(a) に示すポイント A，ロボットの方向が傾斜面の傾斜方向と一致する場合，最適な胴体姿勢は  $\psi_{bR}=0.1[deg], \psi_{bP}=9.3[deg]$  であり，②Fig.3.2(a) に示すポイント B，傾斜面方向とロボットの方向が  $90$  度となる場合，最適な胴体姿勢は  $\psi_{bR}=6.0[deg], \psi_{bP}=2.9[deg]$  である．それぞれのイメージ図を Fig.3.2(c) と Fig.3.2(d) に示す．また，ロボットの方向が  $\psi_{bY}=40.0[deg]$  となったとき，Fig.3.3 に示すように，移動方向がほぼ長方形となっている脚可動範囲の対角線と一致するため，ストローク長が最大となっていることが分かる．

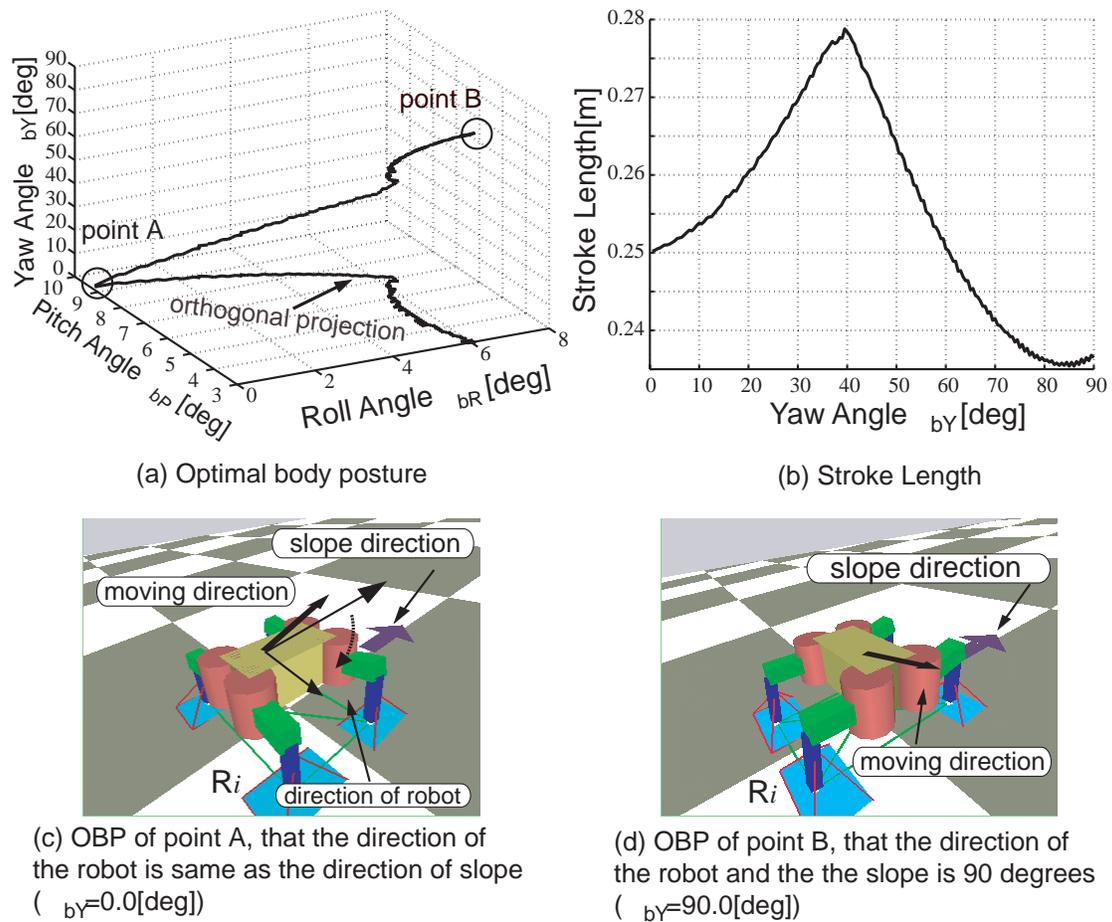


Figure 3.2: The optimal body posture of the specified moving direction on the slope

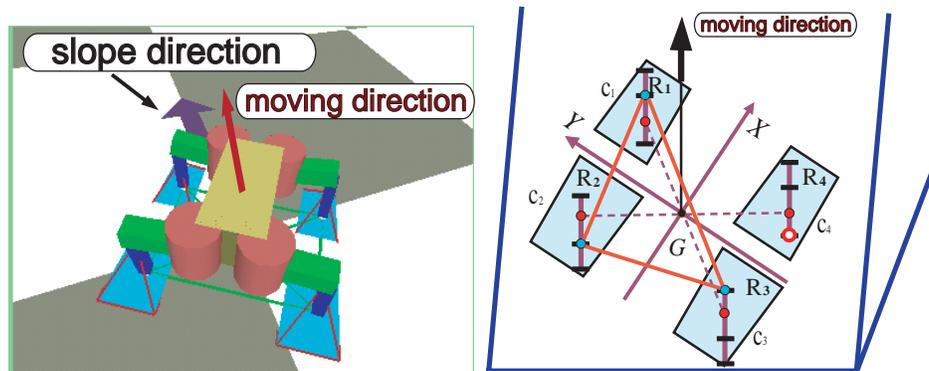


Figure 3.3: The optimal body posture that gives the fastest moving speed for specified moving direction of crawl gait

3.3.2 任意方向のクローल歩容

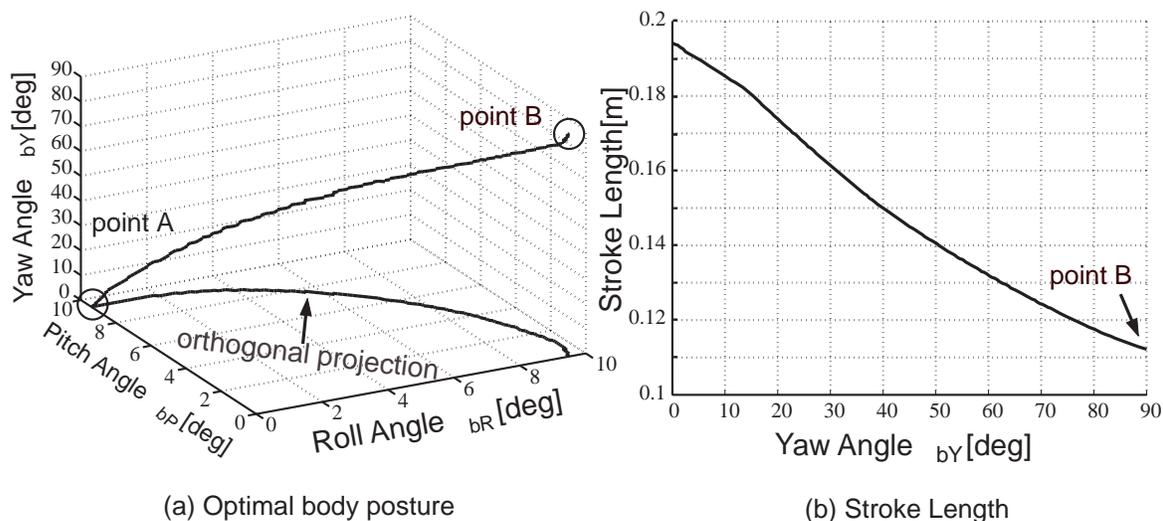


Figure 3.4: The optimal body posture of the arbitrary moving direction on the slope

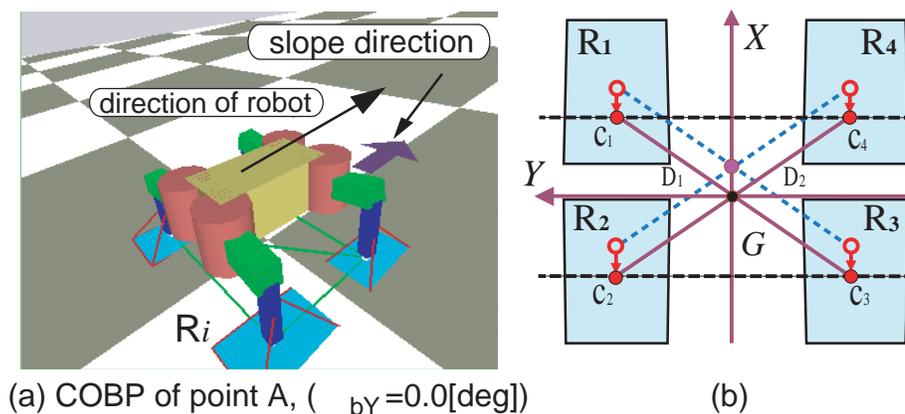


Figure 3.5: The optimal body posture that gives the fastest moving speed for arbitrary moving direction of crawl gait  $\psi_{bY}=0[\text{deg}]$

クロール歩容での任意方向への移動を考慮する．移動方向が指定されない場合，最適な胴体姿勢はロボットが停止状態から任意の移動方向に対して，最大移動速度（最大ストローク長）が取れる姿勢である．即ち，全ての方向に対して4つの脚のうち，出し得るストローク長の最小値が最も大きく取れる姿勢が最適な胴体姿勢となる．

Fig.3.4は傾斜面上，クロール歩容で任意方向へ最大の移動速度が取れる最適な胴体姿勢を示す．図から分かるように，①Fig.3.4(a)に示すポイントA，ロボッ

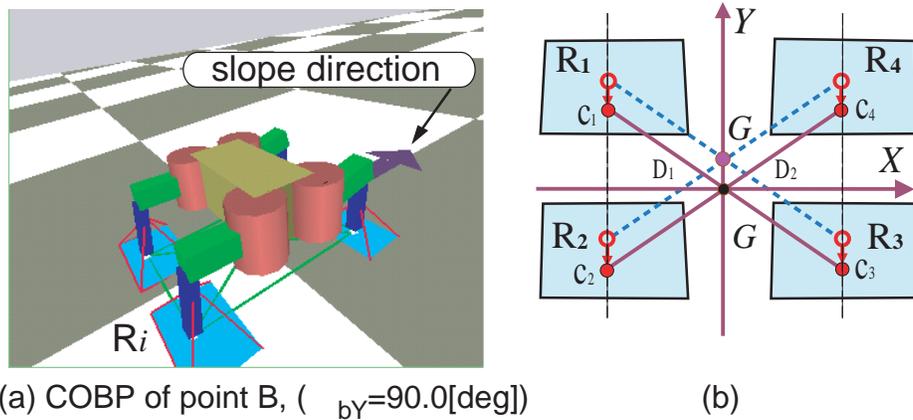


Figure 3.6: The optimal body posture that gives the fastest moving speed for arbitrary moving direction of crawl gait  $\psi_{bY}=90[\text{deg}]$

トの方向が傾斜面の傾斜方向と一致する場合 ( $\psi_{bY}=0.0[\text{deg}]$ ), 最適な胴体姿勢は  $\psi_{bR}=0.0[\text{deg}], \psi_{bP}=9.4[\text{deg}]$  であり, ②Fig.3.4(a) に示すポイント B, 傾斜面方向とロボットの方法が90度となる場合 ( $\psi_{bY}=90.0[\text{deg}]$ ), 最適な胴体姿勢は  $\psi_{bR}=9.5[\text{deg}], \psi_{bP}=0.0[\text{deg}]$  である. 何れも傾斜面と平行ではないことが分かる.

また, Fig.3.4 に示すように,  $\psi_{bY}=0.0[\text{deg}]$  から  $Yaw$  角が増えるにつれ, 出し得る  $S_k$  が減少する一方である. これは, 任意方向のクローリング歩容を考えるとときに  $Y$  クローリング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. Fig.3.4(a) に示すポイント A では, 脚基準位置  $c_i$  が斜面下方へシフトするため,  $Y$  クローリング方向への影響はない. このとき, Fig.3.5 に示すように,  $Y$  クローリング方向の  $S_k$  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, Fig.3.4(a) に示すポイント B では, Fig.3.6 に示すように,  $c_i$  のシフトによる  $Y$  クローリング方向への影響が最も大きく, このとき ( Fig.3.4(b) の B 点 ) の  $S_k$  が最小となっていることが分かる.

## 3.3.3 循環歩容

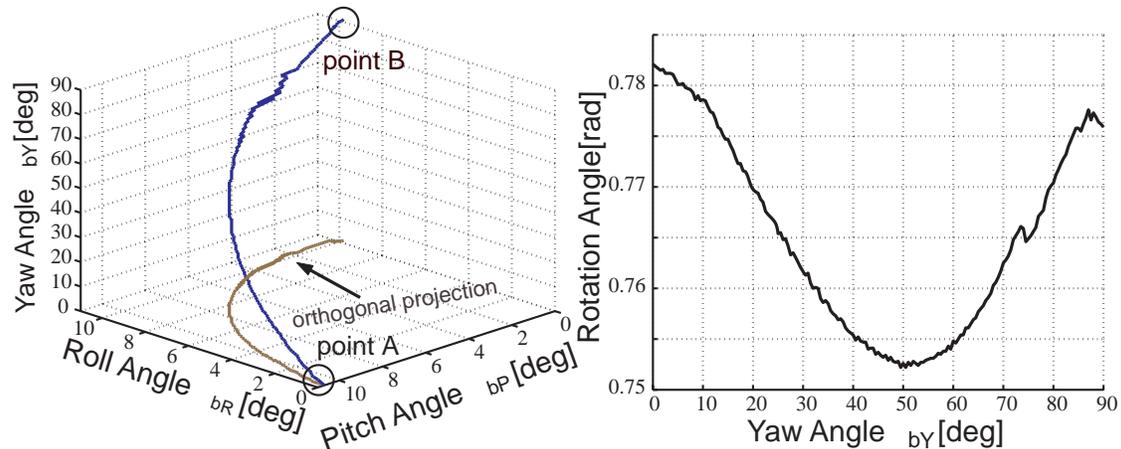


Figure 3.7: The optimal body posture of the rotation gait on the slope

循環歩容ではその場の旋回について最大旋回角速度が取れる姿勢を求める。

Fig.3.7は傾斜面上、循環歩容の最適な胴体姿勢を示す．図から分かるように、①Fig.3.7(a)に示すポイントA，ロボットの方向が傾斜面の傾斜方向と一致する場合，最適な胴体姿勢は $\psi_{bR}=0.0[\text{deg}], \psi_{bP}=10.7[\text{deg}]$ であり，②Fig.3.7(a)に示すポイントB，傾斜面方向とロボットの方向が90度となる場合，最適な胴体姿勢は $\psi_{bR}=10.0[\text{deg}], \psi_{bP}=-0.2[\text{deg}]$ である． $\psi_{bY}=0.0[\text{deg}]$ からYaw角が増えるにつれ，旋回速度が減少する．また，ロボットの方向が $\psi_{bY}=50.0[\text{deg}]$ の場合，旋回速度が最小となり，その後，Yaw角の増加にともなって旋回速度が再び増大することが分かる．この対称の変化では，脚可動範囲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，最適な胴体姿勢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胴体姿勢が時々刻々に変化することが分かる．

Table 3.2: Optimal body posture of special point A,B

| Gait Pattern                              | OBP Point | Yaw [deg] | Roll [deg] | Pitch [deg] |
|---|-----------|-----------|------------|-------------|
| Crawl gait for arbitrary direction        | A         | 0         | 0.0        | 9.4         |
|   | B         | 90        | 9.5        | 0.0         |
| Crawl gait for specified moving direction | A         | 0         | 0.1        | 9.3         |
|   | B         | 90        | 6.0        | 2.9         |
| Rotation gait                             | A         | 0         | 0.0        | 10.7        |
|   | B         | 90        | 10.0       | -0.1        |

そこで，本節で移動方向指定のクロール歩容，任意方向のクロール歩容，循環歩容について導出した最適な胴体姿勢の特殊点を Table.3.2 にまとめる．

### 3.4 最適な胴体姿勢を有する歩容遷移

傾斜面において移動速度を最大にする最適な胴体姿勢を有しながら全方位静歩行を実現するために、連続的な歩容遷移を以下の手順で実現する。

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、新しい歩容に対して最適な胴体姿勢を求め、新しい胴体姿勢の脚可動範囲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、次に示す姿勢変更の条件を満たす遊脚期間で新しい胴体姿勢へ姿勢変更を行うことで、連続的な歩容遷移を実現する。

#### 姿勢変更の条件

1. 遊脚期間中で行うこと、
2. 安定余裕が0より大きいこと、
3. 全ての脚が新しい胴体姿勢の脚可動範囲内に存在すること。

ここで、まず、胴体姿勢の変更を遊脚期間（3脚支持期間）で行う理由について述べる。4脚ロボットは対称機構となっているため、4脚支持期間で胴体姿勢の変更を行っても移動速度の向上に貢献しない。例えば4脚支持期間でロール軸回りに胴体姿勢の変更を行うと、Fig.2.2に示すように、左側の脚1、2の脚可動範囲が大きくなったものの、右側の脚3、4の脚可動範囲が狭くなってしまふ。結果的に、胴体姿勢の変更による移動速度の向上に有効に利用できなくなる。

また、本研究では、デューティ比 $\beta$ を0.75としているため、支持脚三角形の切り替え時点で安定余裕 $S_m$ は必ず0になる。そのため、遊脚期間で遊脚を持ち上げる瞬間から安定余裕をチェックし、0以上であれば姿勢変更を開始する。

そして、姿勢変更の遊脚期間中に支持脚が必ず変更前後の脚可動範囲内に存在しなければならない。その期間中に遊脚が次の歩容の新しい脚軌道（遊脚着地位置）に乗るため、胴体姿勢の脚可動範囲内に存在することが容易に保証される。しかし、3つの支持脚に対してこのような保証がないため、各別にチェックする必要がある。姿勢変更を開始する前の時点で3つの支持脚に対して、支持脚終了位置が新しい胴体姿勢の脚可動範囲内に存在するかどうかを検証する。保証できない場合はアラームを出力し、姿勢変更を行わない。

脚を新しい位置へ動かしていく脚移動順序、新しい胴体姿勢へ姿勢変更の時刻は遷移パターンに依存する。歩容遷移パターンはFig.2.7とFig.2.8に示す歩容間の遷移であり、次のように分類できる

- クロール歩容からクロール歩容への遷移
- クロール歩容から循環歩容への遷移
- 循環歩容からクロール歩容への遷移

### 3.4. 最適な胴体姿勢を有する歩容遷移

---

- 循環歩容から循環歩容への遷移

本節では、上記4つの遷移パターンを安定かつ連続に、最適な胴体姿勢を有する歩容遷移の脚移動順序と姿勢変更時刻について述べる。

### 3.4.1 クロール歩容からクロール歩容への遷移

歩容遷移開始時にどの脚が遊脚化するかにより

Case 1: 遷移一步目の遊脚が遷移後の進行方向に対して前脚となる場合

Case 2: 遷移一步目の遊脚が遷移後の進行方向に対して後脚となる場合

という二つのケースに分けられる．Case 1を Fig.3.8 に示し，Case 2を Fig.3.9 に示す．Fig.3.8と Fig.3.9では，Step 1の実線部分は遷移前の胴体姿勢における脚可動範囲を示し，その内部にある点線は新しい歩容に対する最適な胴体姿勢（新しい胴体姿勢）の脚可動範囲である．また，UはStep 1で遊脚化する脚，Cは脚Uの対角にある脚，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は脚Aの対角にある脚となる．

Case 1, Case 2とも歩容遷移開始1歩目，Step1で姿勢変更を行うと，脚Cの終了位置  $C_{end}$  が新しい胴体姿勢の脚可動範囲内（Case 1の場合は Fig.3.8の Step 2の実線，Case 2の場合は Fig.3.9の Step 2の点線を示している部分）に保証できないため，姿勢変更を行わない．

姿勢変更の時刻はケースによって次のようになる．

Case 1: Step 2で姿勢変更を行う．Step 2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，姿勢変更の条件を満たしているため姿勢変更を行うことができる．Fig.3.8の Step 2に示すように，脚可動範囲を点線（遷移前の胴体姿勢に対する脚可動範囲）から実線（新しい胴体姿勢の脚可動範囲）へ変更した．

Case 2: Step 3で姿勢変更を行う．Step 2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，姿勢変更を行わない．Step 3では脚AとBが基準位置にあり，脚Cが新しい歩容の脚位置にある．姿勢変更の条件を満たしたので，Step 3で姿勢変更を行うことができる．

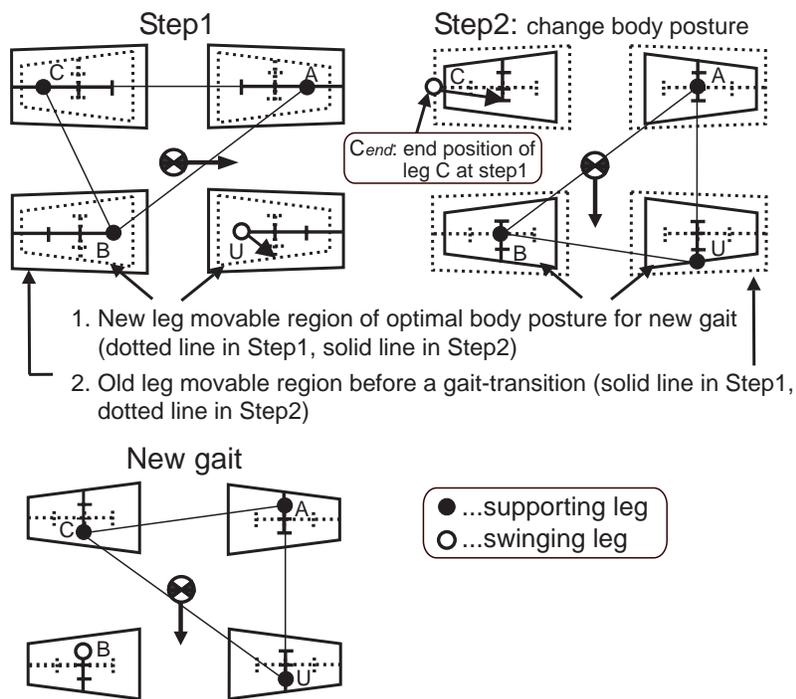


Figure 3.8: Gait-transition case 1 from crawl gait to crawl gait with optimal body posture

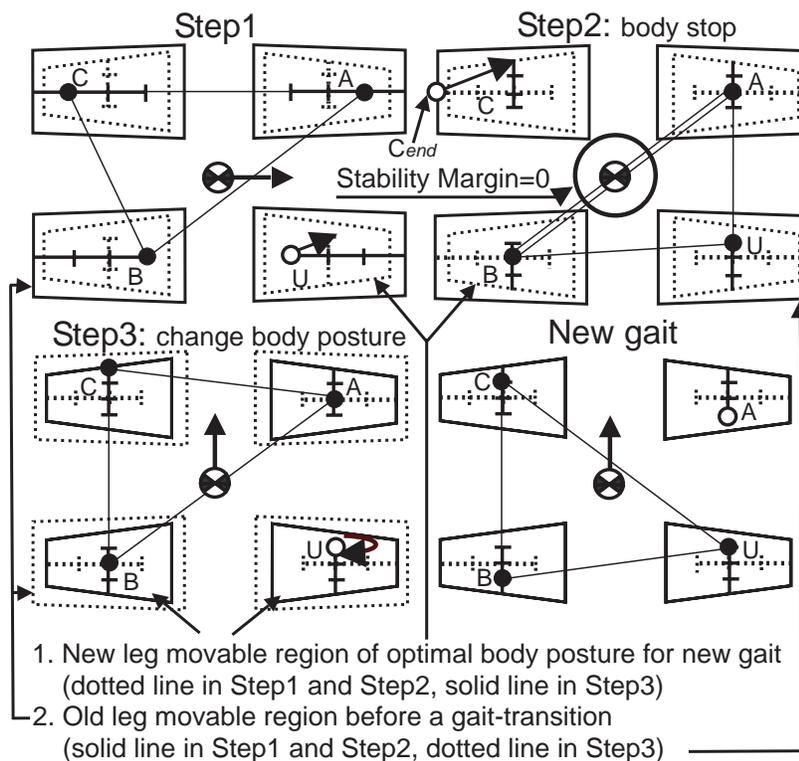


Figure 3.9: Gait-transition case 2 from crawl gait to crawl gait with optimal body posture

### 3.4.2 クロール歩容から循環歩容への遷移

遷移2歩目、脚Aが遊脚化可能であるかどうかによって遷移パターンが二つに分られる。Case 1をFig.3.10に、Case 2をFig.3.11に示す。ここで、UはStep 1で遊脚化する脚、Cは脚Uの対角にある脚、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。

Step 1ではクロール歩容からクロール歩容への遷移と同様、変更を行わない。Step 2ではケースによって次のようになる。

**Case 1:** Step 2では脚Cの旋回分の脚可動範囲が保証されないため、胴体の移動を遊脚時間1回分だけ停止させる必要がある。また、脚Cの位置が新しい胴体姿勢の脚可動範囲内に保証できないため、姿勢変更を行わない。

**Case 2:** Step 2とStep 3では脚Cの旋回分の脚可動範囲が保証されないため、胴体の移動を2回停止させる必要がある。Step 2では脚AとBが基準位置にあり、安定余裕が0であるため、姿勢変更を行わない。

Case 1, Case 2とも歩容遷移開始3歩目、Step 3で姿勢変更を行う。Step 3では脚Bが基準位置にあり、脚UとAが次の歩容の脚位置にある。姿勢変更の条件を満たしたのでCase 1, Case 2ともStep 3で姿勢変更を行うことができる。

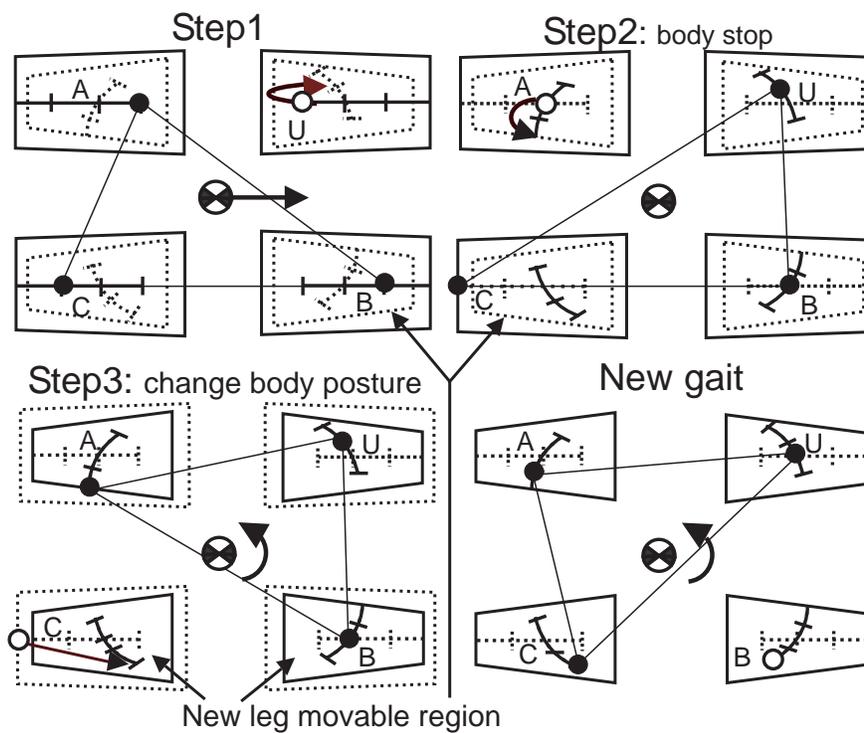


Figure 3.10: Gait-transition case 1 from crawl gait to rotation gait with optimal body posture

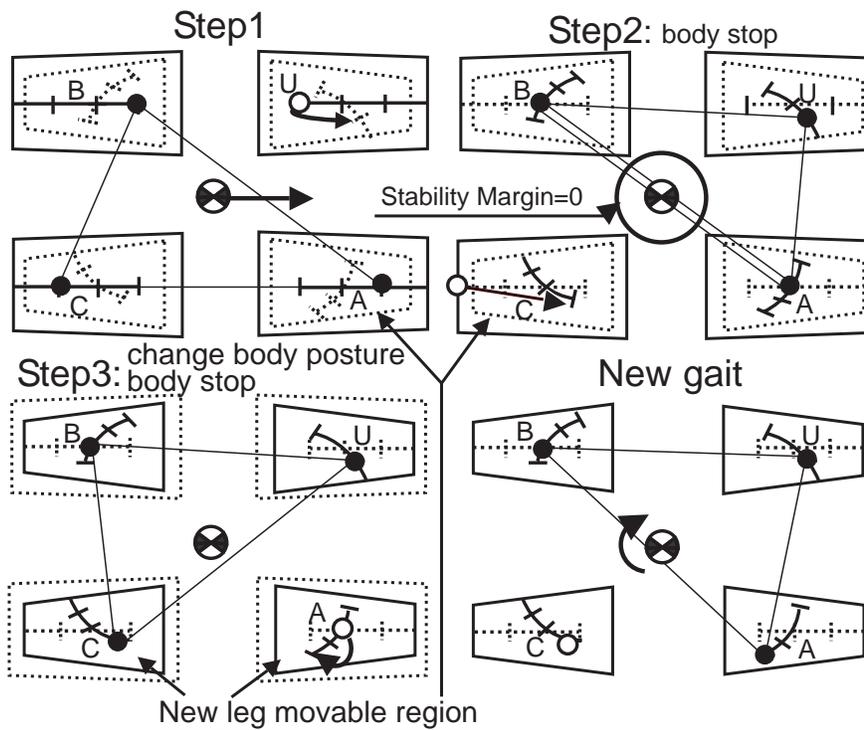


Figure 3.11: Gait-transition case 2 from crawl gait to rotation gait with optimal body posture

## 3.4.3 循環歩容からクロール歩容への遷移

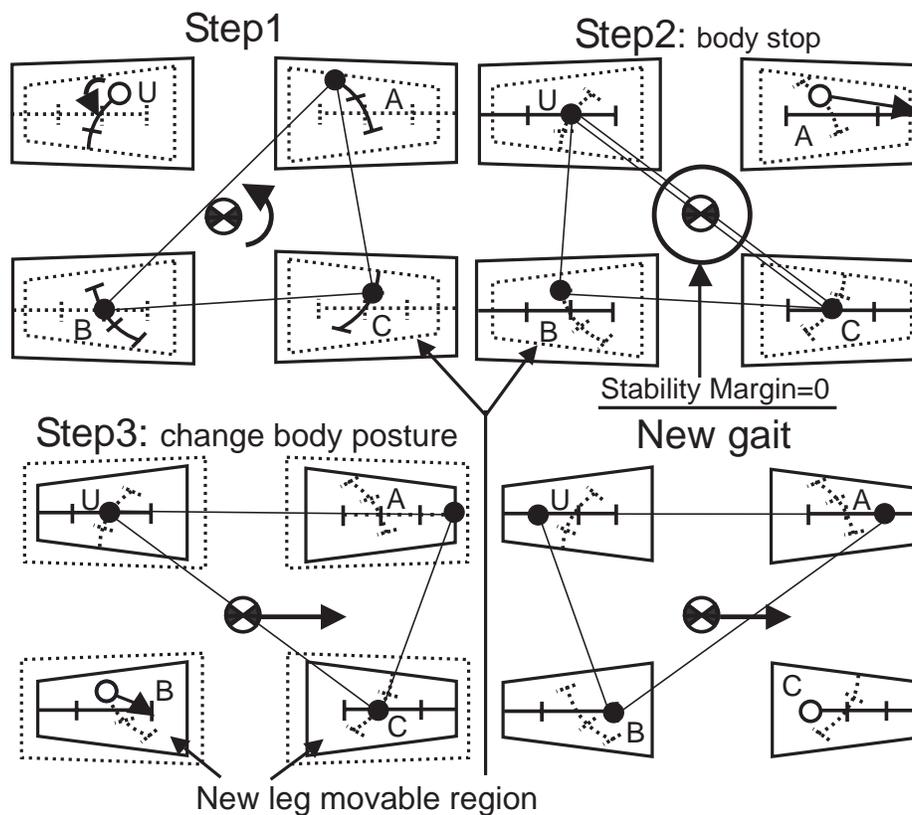


Figure 3.12: Gait-transition from rotation gait to crawl gait with optimal body posture

Fig.3.12 に示すように、循環歩容のどのような脚配置であっても歩容遷移が実行可能である。ここで、U は Step 1 で遊脚化する脚、C は脚 U の対角にある脚、A は脚 C と U 以外で遷移後の進行方向に対して前脚となる脚、B は脚 A の対角にある脚となる。

姿勢変更の時刻は遷移 3 歩目、Step 3 で変更を行う。Step 1 では姿勢変更の条件を保証できないため変更を行わない。Step 2 では脚 U と C が基準位置にあり、脚 A、B とも遊脚化可能であるが、遷移後の進行方向に支持脚三角形を形成するため、脚 A を先に遊脚化する。このとき、胴体を遊脚時間 1 回分だけ停止させる必要がある。また、安定余裕が 0 であるため、姿勢変更を行わない。Step 3 では脚 U、C が基準位置にあり、脚 A が次の歩容の脚位置にある。姿勢変更の条件を満たしたので Step 3 で姿勢変更を行うことができる。

## 3.4.4 循環歩容から循環歩容への遷移

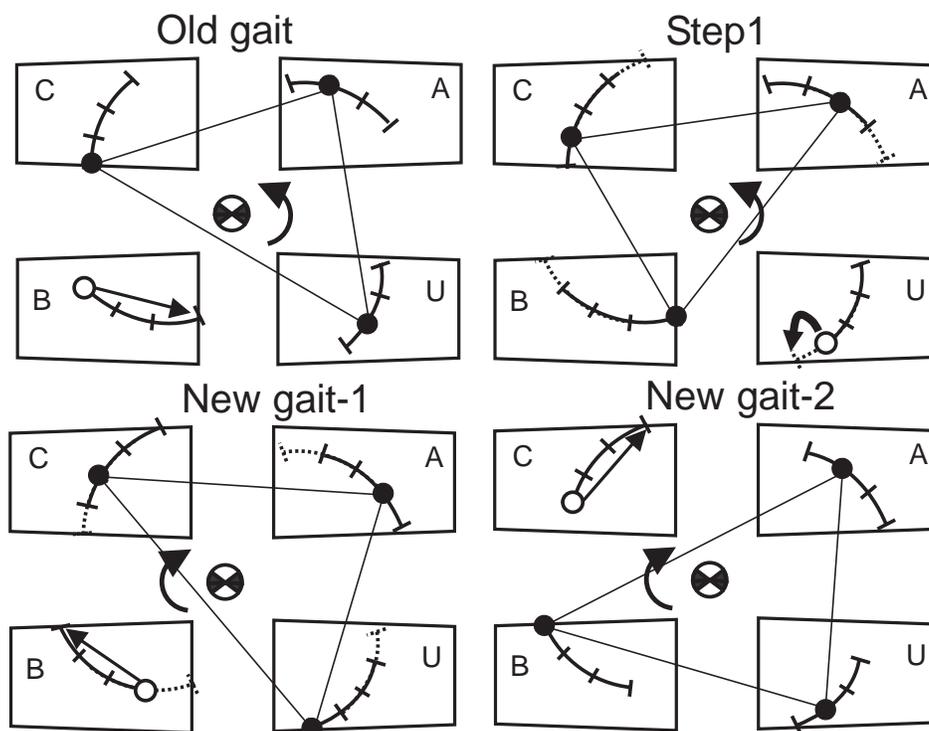


Figure 3.13: Gait-transition from rotation gait to rotation gait with optimal body posture

Fig.3.13 に示すように、循環歩容から循環歩容への歩容遷移がどのような脚配置からでも実行可能である。脚の記号はクロール歩容から循環歩容への遷移と同じである。循環歩容から循環歩容への歩容遷移を行う際、胴体の姿勢変更は決まった Step で行うのではなく、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を最適な胴体姿勢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 $\frac{2}{3}$ は同じ脚軌道となる。よって、Step 1 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。

### 3.5 おわりに

本章で述べた手法では、最適な胴体姿勢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。第5章にて、計算機シミュレーション実験により、その最適な胴体姿勢を有しながら傾斜面において連続的に歩容遷移を行う手法の有効性を検証する。

本章では、4脚ロボットの対地適応力を高めるため、傾斜面歩行環境に応じた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、その最適な胴体姿勢を有しながら傾斜面において連続的に歩容遷移を行う手法を提案した。傾斜面における最適な胴体姿勢としては、クロール歩容に対して任意の移動方向及び指定された方向、循環歩容に対してその場の旋回について導出した移動速度を最大にする胴体姿勢である。これらの歩容を組み合わせることによって最適な胴体姿勢を有する全方位静歩行を実現することができる。まず勾配法を用いて非線形最適化問題となる傾斜面における最適な胴体姿勢の誘導法について述べ、次にその最適な胴体姿勢を維持した連続的な歩容遷移手法を詳細に述べた。提案した手法を用いて、4脚ロボットは傾斜面において、安定かつ連続に、移動速度を最大にする最適な胴体姿勢を維持した上で、全方位静歩行を実現していることを示した。

# 第4章 重心高さを生かした最適な胴体姿勢を有する全方位静歩行

## 目次

---

|       |                                    |     |
|-------|------------------------------------|-----|
| 4.1   | はじめに . . . . .                     | 84  |
| 4.2   | 重心高さによる安定性と移動速度への影響 . . . . .      | 85  |
| 4.2.1 | 安定性評価指標 . . . . .                  | 85  |
| 4.2.2 | クロール歩容と循環歩容の安定性 . . . . .          | 86  |
| 4.2.3 | 3脚支持期間の安定性 . . . . .               | 87  |
| 4.3   | 最適化問題 . . . . .                    | 91  |
| 4.3.1 | 条件付き非線形最適化 . . . . .               | 91  |
| 4.3.2 | 問題の設定 . . . . .                    | 91  |
| 4.4   | 重心高さを生かした最適な胴体姿勢の導出 . . . . .      | 94  |
| 4.4.1 | 移動方向指定のクロール歩容 . . . . .            | 95  |
| 4.4.2 | 任意方向のクロール歩容 . . . . .              | 96  |
| 4.4.3 | 循環歩容 . . . . .                     | 97  |
| 4.5   | 重心高さを生かした最適な胴体姿勢を有する歩容遷移 . . . . . | 98  |
| 4.5.1 | クロール歩容からクロール歩容への遷移 . . . . .       | 99  |
| 4.5.2 | クロール歩容から循環歩容への遷移 . . . . .         | 101 |
| 4.5.3 | 循環歩容からクロール歩容への遷移 . . . . .         | 103 |
| 4.5.4 | 循環歩容から循環歩容への遷移 . . . . .           | 104 |
| 4.6   | おわりに . . . . .                     | 105 |

---

## 4.1 はじめに

前章までに、4脚ロボットの対地適応力を高めるため、傾斜面歩行環境に応じた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、その最適な胴体姿勢を有しながら傾斜面において連続的に歩容遷移を行う手法を提案した。しかし、これまで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。従来の4脚ロボットの胴体姿勢と重心高さを扱う手法としては、姿勢変更を考慮した軌道追従歩容 [44]、頭上障害物を潜り抜けるために重心高さの変更 [45] が提案されているものの、積極的に重心高さと胴体姿勢を変更することによる安定性の向上、移動速度の最大化及び全方位静歩行の実現を統合的に議論する研究が行われていなかった。

そこで、本章では斜面における4脚ロボットの安定性と移動速度を向上させるために、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た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を明らかにする。さらに、この重心高さを生かした最適な胴体姿勢を有しながら安定、かつ連続的な斜面全方位静歩行を実現する手法について述べる。ここで、重心高さを生かした最適な胴体姿勢（COG-Correspondent Optimal Body Postures）はCOBPと省略する。

第4.2節では、傾斜面において重心高さの変更による4脚ロボットの移動速度と安定性の向上について考える。その安定性の検討に必要な3脚支持期間の安定性について詳細に述べる。まず、重心高さを降下させることによって、脚基準位置のシフト量が減少したり脚可動範囲が大きくなったりするため、移動速度を高めることが可能である。また、傾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大きくなることも明らかにされている [13]。

第4.3節では、逐次2次計画法を用いて安定性を考慮した制約付き非線形最適化問題となる重心高さを生かした最適な胴体姿勢の誘導法について述べる。胴体姿勢を任意に傾斜させた場合、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がこれらの変化に応じて変わるため、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重心高さを生かした最適な胴体姿勢の誘導に逐次2次計画法（SQP法）[55] [54]を用いる。

第4.4節では、誘導した重心高さを生かした最適な胴体姿勢を有しながら傾斜面において連続的に歩容遷移を行う手法を提案する。

## 4.2 重心高さによる安定性と移動速度への影響

斜面において重心高さの変更による4脚ロボットの移動速度と安定性の向上について考える。

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 [13]。

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準位置のシフト量  $\Delta c_i$  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、Fig.2.4 に示すように、重心投影点  $G_\gamma$  のシフト量  $\Delta G_\gamma$  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  $G_\gamma$  の位置変化に伴って  $\Delta c_i$  が変化する。結果的に、重心高さを変更することで、 $\Delta c_i$  は  $\Delta G_\gamma$  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推測される。

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と考えられる。

### 4.2.1 安定性評価指標

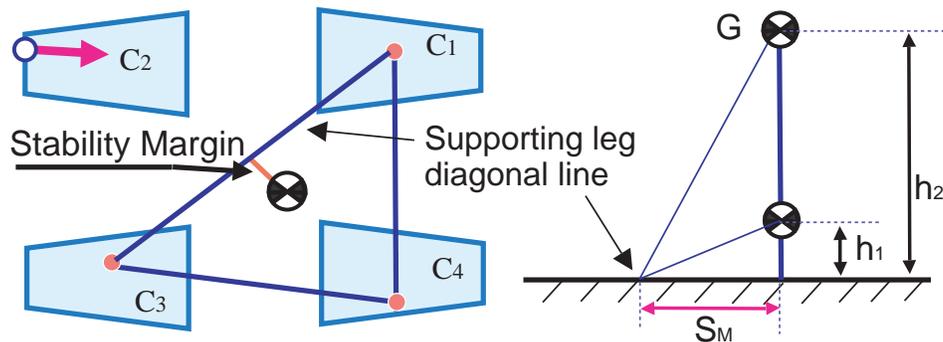


Figure 4.1: Influence on stability margin  $S_M$  by changing the height of COG

重心高さによる安定性と移動速度への影響について検討するために、まず静的安定性評価指標を考える。これまでの全方位静歩行 [23, 25, 26, 29] の静的安定条件として、安定余裕  $S_M$  が非負、つまり  $S_M \geq 0$  を満たすことである。しかし、 $S_M$  には重心高さの変更による影響がない。Fig.4.1 に示すように、同じ支持脚対角線に対して、重心高さを  $h_2$  から  $h_1$  へ降下しても重心投影点から支持脚対角線までの距離が変化しないため、安定性が明らかに高くなるが、安定余裕  $S_M$  には変化がない。

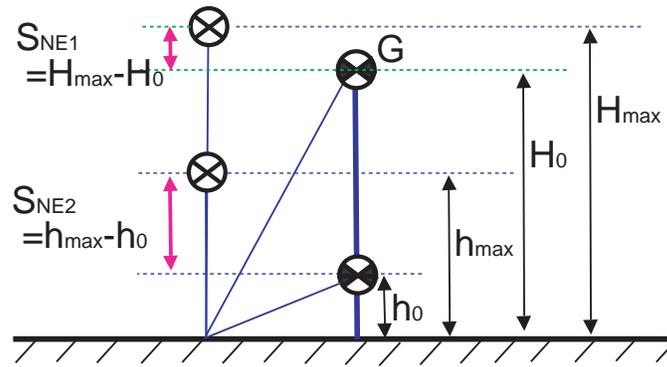


Figure 4.2: Influence on NE stability margin  $S_{NE}$  by changing the height of COG

一方、この  $S_M$  に対して、重心高さによる安定性への影響を考慮する正規化エネルギー安定余裕 (NE 安定余裕)  $S_{NE}$  が提案された [13]。  $S_{NE}$  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。 Fig.4.2 に示すように、同じ支持脚対角線に対して、重心高さを  $H_0$  から  $h_0$  へ降下した際に、  $S_M$  が変化しなくても、明らかに  $S_{NE2} > S_{NE1}$  であり、安定性が大きくなっていることが分かる。しかし、 Fig.1.16 に示すように、NE 安定余裕  $S_{NE}$  は重心投影点が転倒軸 (支持脚対角線) に乗ったとき最小となる。この最小値は 0 である。  $S_M$  は負の値が存在し、負になるとロボットが不安定な状態になり、転倒を始める。  $S_{NE}$  はこのような負の値にならないため、ロボットのある瞬間における安定性 (転倒するかどうか) を判定できない。

本研究では、安定余裕  $S_M$  と NE 安定余裕  $S_{NE}$  両方を同時に使用する。それは、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  $S_{NE}$  で評価するためである。

#### 4.2.2 クロール歩容と循環歩容の安定性

クロール歩容と循環歩容について歩行時のロボットの安定性を検討する。

##### クロール歩容

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、支持脚対角線  $D_i$  を重心投影点  $G_\gamma$  を通過する際に  $S_M$  と  $S_{NE}$  がともに 0 である。このとき、ロボットが安定的な歩行を行う保証がない。従来、ロボットの脚先が一定の面積を持つために  $S_M$  が一瞬 0 になっても安定であることを仮定していた。しかし、ロボットが側行歩容を行う時のように  $S_M$  が小さく、0 以上に維持しても安定的な歩行を必ずしも実現できる保証がない。

### 循環歩容

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、安定な歩行が行える。しかし、傾斜面において重心投影点  $G_\gamma$  が傾斜面下方へシフトするため、傾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  $G_\gamma$  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  $\beta$  を 0.75 に設定するため、4脚支持期間が一瞬存在するものの、全体的に安定性の向上に影響しない。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。

### 4.2.3 3脚支持期間の安定性

本節では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述べる。

Fig.2.7 と Fig.2.8 に示すように、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。

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 Fig.4.3, Fig.4.4 と Fig.4.5 に示す。

Table 4.1: Changing of supporting leg diagonal lines  $D_i$

| Gait Type | D1  | D2  | D3  | D4  |
|-----------|---|---|---|---|
| X-crawl   | $P_{21}-P_{42} \Rightarrow P_{22}-P_{43}$ | $P_{22}-P_{43} \Rightarrow P_{21}-P_{42}$ | $P_{12}-P_{31} \Rightarrow P_{13}-P_{32}$ | $P_{13}-P_{32} \Rightarrow P_{14}-P_{33}$ |
| Y-crawl   | $P_{22}-P_{41} \Rightarrow P_{23}-P_{42}$ | $P_{23}-P_{42} \Rightarrow P_{24}-P_{43}$ |   |   |
| Rotation  | $P_{23}-P_{41} \Rightarrow P_{24}-P_{42}$ | $P_{11}-P_{33} \Rightarrow P_{12}-P_{34}$ | $P_{21}-P_{43} \Rightarrow P_{22}-P_{44}$ | $P_{13}-P_{31} \Rightarrow P_{14}-P_{32}$ |

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 Table.4.1 に示す。例として、Xクロールで脚1が遊脚となる場合、Fig.4.3 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、Fig.4.6 に示すように、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 [13]。

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NE安定余裕  $S_{NE}$  の平均値を用いて、重心高さの変更による安定性への影響を検討する。Table.4.1 に示す1周期内にある4つの  $D_i$  の変化に対して

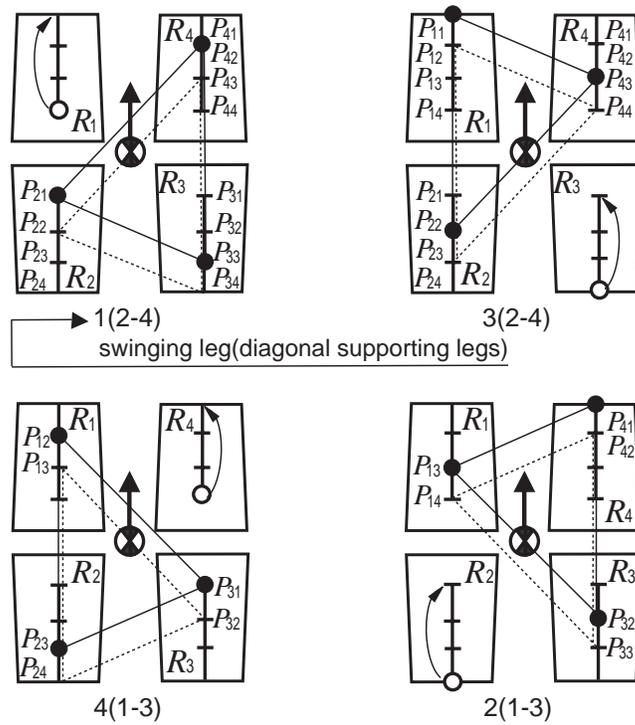


Figure 4.3: Three legs supporting period of X-crawl gait

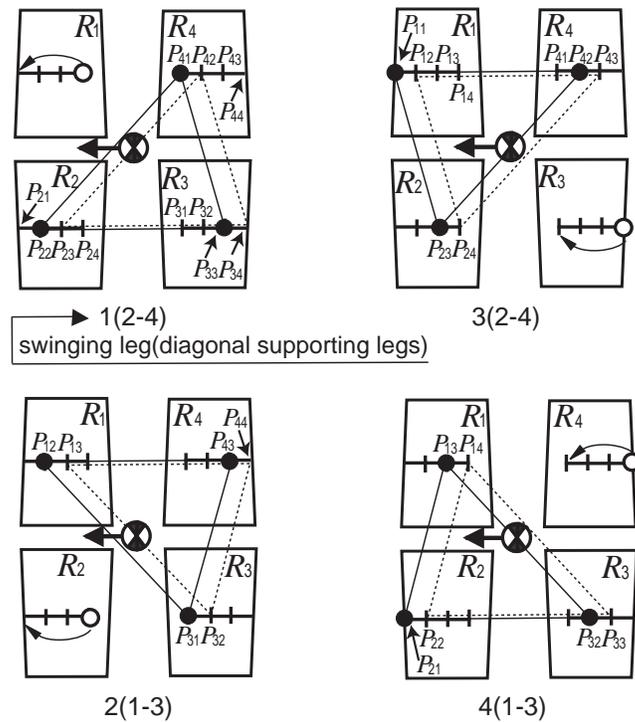


Figure 4.4: Three legs supporting period of Y-crawl gait

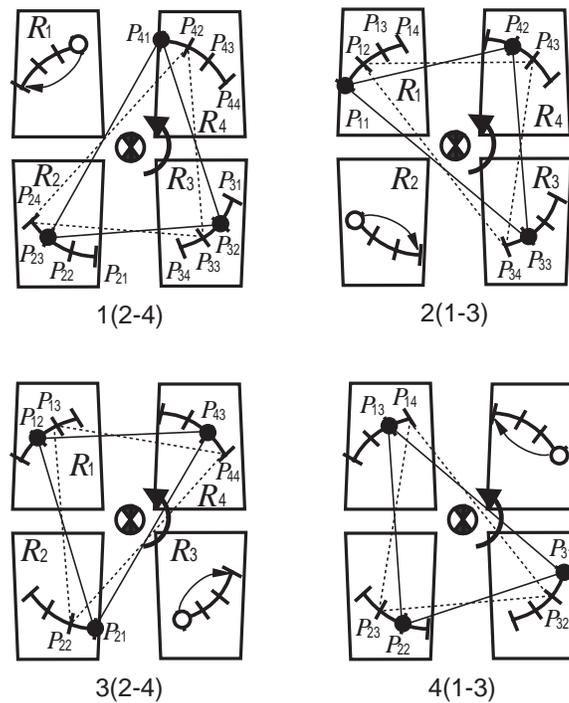


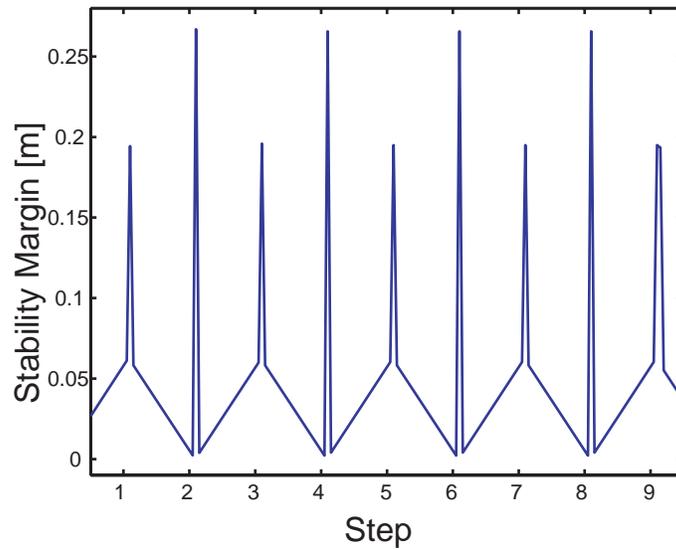
Figure 4.5: Three legs supporting period of rotation gait

 Table 4.2: The experience value of  $S_{NEAvg}$  by real robot experiment ( $H_{cog} = 0.243[m]$ )

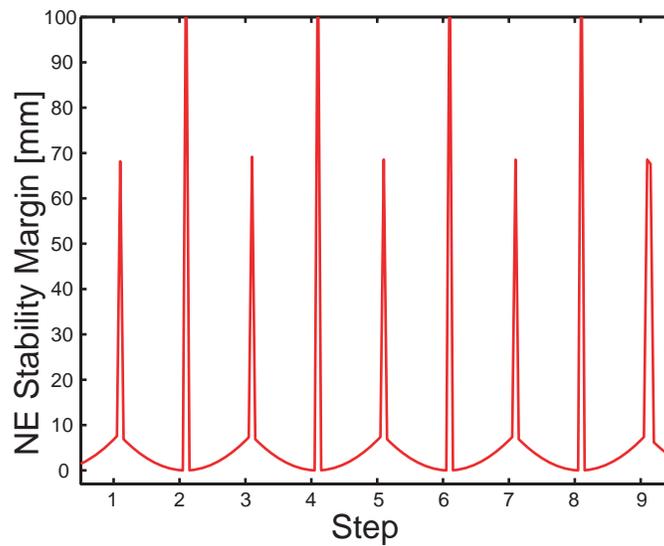
| Walking Environment                           | Gait Type | bR [deg] | bP [deg] | bY [deg] | $S_{NEAvg}$ [mm] |
|---|-----------|----------|----------|----------|------------------|
| Horizontal plane                              | X-Crawl   | 0        | 0        | 0        | 2.685            |
|   | Y-Crawl   |          |          |          | 0.535            |
| Inclination angle of Slope ( $\psi=10$ [deg]) | X-Crawl   | 0        | 10       | 0        | 1.178            |
|   | Y-Crawl   |          |          |          | 0.476            |
|   | X-Crawl   | 10       | 0        | 90       | 2.526            |
|   | Y-Crawl   |          |          |          | <b>0.128</b>     |

$S_{NE}$  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、Table.4.1 にある  $D_i$  の位置変化を示す矢印 ( $\Rightarrow$ ) の方向を逆にすることで、それぞれの RX,RY 型クローラ歩容、RO 型循環歩容に対する  $S_{NEAvg}$  が得られる。

水平面および傾斜面において行った実機実験の各パターンについて  $S_{NEAvg}$  を求め、Table.4.2 に示す。そのうち、 $S_{NEAvg}$  が最も小さい ( $\psi=10$ [deg],  $\psi_{bY}=90$ [deg] での Y クローラを行う) 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、傾斜面上の歩行が実現されている。本論文では、この実験結果による経験



(a) Stability margin  $S_M$



(b) Normalized energy stability margin  $S_{NE}$

Figure 4.6: The stability margin  $S_M$  and normalized energy stability margin  $S_{NE}$  during a walk

値 ( $S_{NAmin}=0.128[\text{mm}]$ ) を用いる。

本節では、傾斜面において重心高さの変更による4脚ロボットの移動速度と安定性の向上について検討した。次節から、その経験値 ( $S_{NAmin}$ ) を用いて重心高さを生かした最適な胴体姿勢の誘導を行う。

## 4.3 最適化問題

傾斜面において4脚ロボットの歩行中に指定した  $S_{NAmin}$  を維持した上で、傾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や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) [55] [54] を用いる。

### 4.3.1 条件付き非線形最適化

逐次2次計画法は次の問題の対して現在最も有効とされている方法である。

$$\begin{aligned} \text{目的関数 } & f(\mathbf{x}) \longrightarrow \min \\ \text{制約条件 } & c_i(\mathbf{x}) \leq 0 \quad (i = 1, 2, \dots, m) \end{aligned} \quad (4.1)$$

点  $\mathbf{x}$  における目的関数  $f(\mathbf{x})$  を最小、制約条件  $c_i(\mathbf{x}) \leq 0$  のような不等式制約をもつ最適化問題に対して逐次2次計画法 (SQP法) では、第  $k$  反復において点  $\mathbf{x} \in R^n$  が与えられたとき、部分問題として次の2次計画問題を解くこととなる。

### 4.3.2 問題の設定

本研究では、クロール歩容と循環歩容に基づく全方位静歩行を行うため、目的関数  $f(\mathbf{x})$  はクロール歩容に対して最大ストローク長、循環歩容に対して最大旋回角度とする。傾斜面の傾斜角  $\psi$  とロボットの歩行方向 (Yaw角  $\psi_{bY}$ ) を入力項とし、目的関数を最大化する最適な重心高さや最適な胴体姿勢を求める。変数  $\mathbf{x}$  はロボットの重心高さ  $H_{cog}$ 、Roll角とPitch角からなる3次元実ベクトルであり、 $\mathbf{x} = (h, \psi_{bR}, \psi_{bP})^T$  で表す。制約条件を  $S_{NEAvg} \geq S_{E Amin}$  とする。また、Fig.2.5に示す脚基準位置の決定アルゴリズムの安定余裕に関するパラメータを  $S_M = S_{\min} = S_{\text{hor}}$  のように設定し、脚基準位置が存在するような全ての重心高さや胴体姿勢を検討対象とする。SQP法による最適な重心高さや最適な胴体姿勢の探索手順を次に示す。

Step1:初期化。脚基準位置が存在するような重心高さや胴体姿勢を初期値  $\mathbf{x}^{(0)} \in R^3$ 、 $3 \times 3$  正定値対称行列  $B^{(0)}$  を選び、 $k := 0$  とおく。

Step2:部分問題の解の計算。2次計画問題式 (4.2) を解いて、式 (4.3) を満たすベクトル対  $(\mathbf{d}^{(k)}, \mathbf{v}^{(k)})$  を求める。

$$\begin{aligned} \text{目的関数 } & \nabla f(\mathbf{x}^{(k)})^T \mathbf{d} + \frac{1}{2} \mathbf{d}^T B^{(k)} \mathbf{d} \longrightarrow \min \\ \text{制約条件 } & c(\mathbf{x}^{(k)}) + \nabla c(\mathbf{x}^{(k)})^T \mathbf{d} \leq 0 \end{aligned} \quad (4.2)$$

$B$  はラグランジュ関数  $L(\mathbf{x}, u) = f(\mathbf{x}) + uc(\mathbf{x})$  のヘッセ行列  $\nabla_x^2 L(\mathbf{x}, u)$  を近似した正定値対称行列である。最急降下探索方向ベクトル  $\mathbf{d}^{(k)}$  を式(4.4)で計算する。行列  $B^{(k)}$  の逆行列  $(B^{(k)})^{-1}$  は  $H^{(k)} := (B^{(k)})^{-1}$  を用いる。十分小さい正の定数  $\varepsilon$  に対して  $\|\nabla \mathbf{d}^{(k)}\| < \varepsilon$  が成り立てば計算を終了し、求めた  $\mathbf{x}$  を最適な重心高さと同体姿勢とする。ここで、差分法を用いて目的関数と制約関数の勾配を近似的に求める。

$$\begin{cases} \nabla f(\mathbf{x}^{(k)}) + B^{(k)} \mathbf{d} + v c(\mathbf{x}^{(k)}) = 0 \\ c(\mathbf{x}^{(k)}) + \nabla c(\mathbf{x}^{(k)})^T \mathbf{d} \leq 0, \quad v \geq 0 \\ v \{c(\mathbf{x}^{(k)}) + \nabla c(\mathbf{x}^{(k)})^T \mathbf{d}\} = 0 \end{cases} \quad (4.3)$$

$$\mathbf{d}^{(k)} = -H^{(k)} \nabla f(\mathbf{x}^{(k)}) = -(B^{(k)})^{-1} \nabla f(\mathbf{x}^{(k)}) \quad (4.4)$$

$$\|\nabla f(\mathbf{x}^{(k)})\| < \varepsilon \quad (4.5)$$

目的関数、制約関数の勾配は式(4.6)(4.7)で求める。

$$\nabla f(\mathbf{x}^{(k)}) = (\partial f(\mathbf{x}^{(k)})/\partial h, \partial f(\mathbf{x}^{(k)})/\partial \psi_{bR}, \partial f(\mathbf{x}^{(k)})/\partial \psi_{bP})^T \quad (4.6)$$

$$\nabla c(\mathbf{x}^{(k)}) = (\partial c(\mathbf{x}^{(k)})/\partial h, \partial c(\mathbf{x}^{(k)})/\partial \psi_{bR}, \partial c(\mathbf{x}^{(k)})/\partial \psi_{bP})^T \quad (4.7)$$

で表し、十分小さな  $(\Delta h, \Delta \psi_{bR}, \Delta \psi_{bP})$  に対して勾配を

$$\begin{cases} \partial f(\mathbf{x}^{(k)})/\partial h = (f(\mathbf{x}^{(k)} + (\Delta h, 0, 0)^T) - f(\mathbf{x}^{(k)}))/\Delta h \\ \partial f(\mathbf{x}^{(k)})/\partial \psi_{bR} = (f(\mathbf{x}^{(k)} + (0, \Delta \psi_{bR}, 0)^T) - f(\mathbf{x}^{(k)}))/\Delta \psi_{bR} \\ \partial f(\mathbf{x}^{(k)})/\partial \psi_{bP} = (f(\mathbf{x}^{(k)} + (0, 0, \Delta \psi_{bP})^T) - f(\mathbf{x}^{(k)}))/\Delta \psi_{bP} \end{cases} \quad (4.8)$$

$$\begin{cases} \partial c(\mathbf{x}^{(k)})/\partial h = (c(\mathbf{x}^{(k)} + (\Delta h, 0, 0)^T) - c(\mathbf{x}^{(k)}))/\Delta h \\ \partial c(\mathbf{x}^{(k)})/\partial \psi_{bR} = (c(\mathbf{x}^{(k)} + (0, \Delta \psi_{bR}, 0)^T) - c(\mathbf{x}^{(k)}))/\Delta \psi_{bR} \\ \partial c(\mathbf{x}^{(k)})/\partial \psi_{bP} = (c(\mathbf{x}^{(k)} + (0, 0, \Delta \psi_{bP})^T) - c(\mathbf{x}^{(k)}))/\Delta \psi_{bP} \end{cases} \quad (4.9)$$

のように近似的に求める。

Step3:直線探索。ペナルティ関数

$$F_\gamma = f(\mathbf{x}) + r \max\{0, c(\mathbf{x})\} \quad (4.10)$$

を導入することによって直線探索を行い，1次元の最適化問題

$$\min_{t>0} F_\gamma(\mathbf{x}^{(k)} + t\mathbf{d}^{(k)}) \quad (4.11)$$

を解く．次の不等式を満たすような  $t$  を  $t^{(k)}$  とし， $\mathbf{x}^{(k+1)} := \mathbf{x}^{(k)} + t^{(k)}\mathbf{d}^{(k)}$  とする．

$$\begin{aligned} F_\gamma(\mathbf{x}^{(k)} + t\mathbf{d}^{(k)}) &\leq F_\gamma(\mathbf{x}^{(k)}) + \beta t[\bar{F}_\gamma(\mathbf{x}^{(k)}, \mathbf{d}^{(k)}) - F_\gamma(\mathbf{x}^{(k)})] \\ \bar{F}_\gamma(\mathbf{x}^{(k)}, \mathbf{d}) &= f(\mathbf{x}^{(k)}) + \nabla f(\mathbf{x}^{(k)})^T \mathbf{d} + \frac{1}{2} \mathbf{d}^T B^{(k)} \mathbf{d} \\ &\quad + \gamma \max\{0, c(\mathbf{x}^{(k)}) + \nabla c(\mathbf{x}^{(k)})^T \mathbf{d}\} \end{aligned} \quad (4.12)$$

ここで， $r$  は十分大きい正の定数であり， $\beta, \gamma$  は  $\beta, \gamma \in (0, 1)$  を満たす定数である．

Step4:行列  $H^{(k)}$  の更新．BFGS 公式

$$\theta = \begin{cases} 1 & (y^{(k)})^T s^{(k)} \geq 0.2(s^{(k)})^T B^{(k)} s^{(k)} \\ \frac{0.8(s^{(k)})^T B^{(k)} s^{(k)}}{(s^{(k)})^T B^{(k)} s^{(k)} - (y^{(k)})^T s^{(k)}} & (other) \end{cases} \quad (4.13)$$

$$\begin{aligned} H^{(k+1)} &= H^{(k)} + \left(1 + \frac{(y^{(k)})^T H^{(k)} y^{(k)}}{(s^{(k)})^T y^{(k)}}\right) \frac{s^{(k)}(s^{(k)})^T}{(s^{(k)})y^{(k)}} \\ &\quad - \frac{s^{(k)}(y^{(k)})^T H^{(k)} + H^{(k)} y^{(k)}(s^{(k)})^T}{(s^{(k)})^T y^{(k)}} \end{aligned} \quad (4.14)$$

$$s^{(k)} = x^{(k+1)} - x^{(k)}$$

$$y^{(k)} = \nabla_x L(x^{(k+1)}, u^{(k+1)}) - \nabla_x L(x^{(k)}, u^{(k+1)})$$

を用いて  $H^{(k)}$  を更新し，新しい行列  $H^{(k+1)}$  を定める． $k := k + 1$  において Step2 へ戻る．

#### 4.4 重心高さを生かした最適な胴体姿勢の導出

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．パラメータを Table 4.3 に示す．傾斜面において，制約条件を満しながらロボットの重心高さや胴体姿勢の変化に伴うストローク長と回転角度を検討する．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  $0 \leq \psi_{bY} \leq 90[\text{deg}]$  とする．

Table 4.3: Specifications of robot model and parameters for COG-Correspondent optimal body postures

|  |                          |
|--|--------------------------|
| 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 ( ) [deg]   | 10.0                     |
| Initial value of $S_{hor}$ [m]   | 0.2                      |
| Minimum stability margin ( $S_{min}$ ) [m]   | 0.2                      |
| Minimum average value of NE stability margin of three leg supporting period ( $S_{NAmin}$ ) [mm] | 0.128                    |
| Minimum stroke ( $Stroke_{min}$ ) [m]  | 0.001                    |

## 4.4.1 移動方向指定のクロール歩容

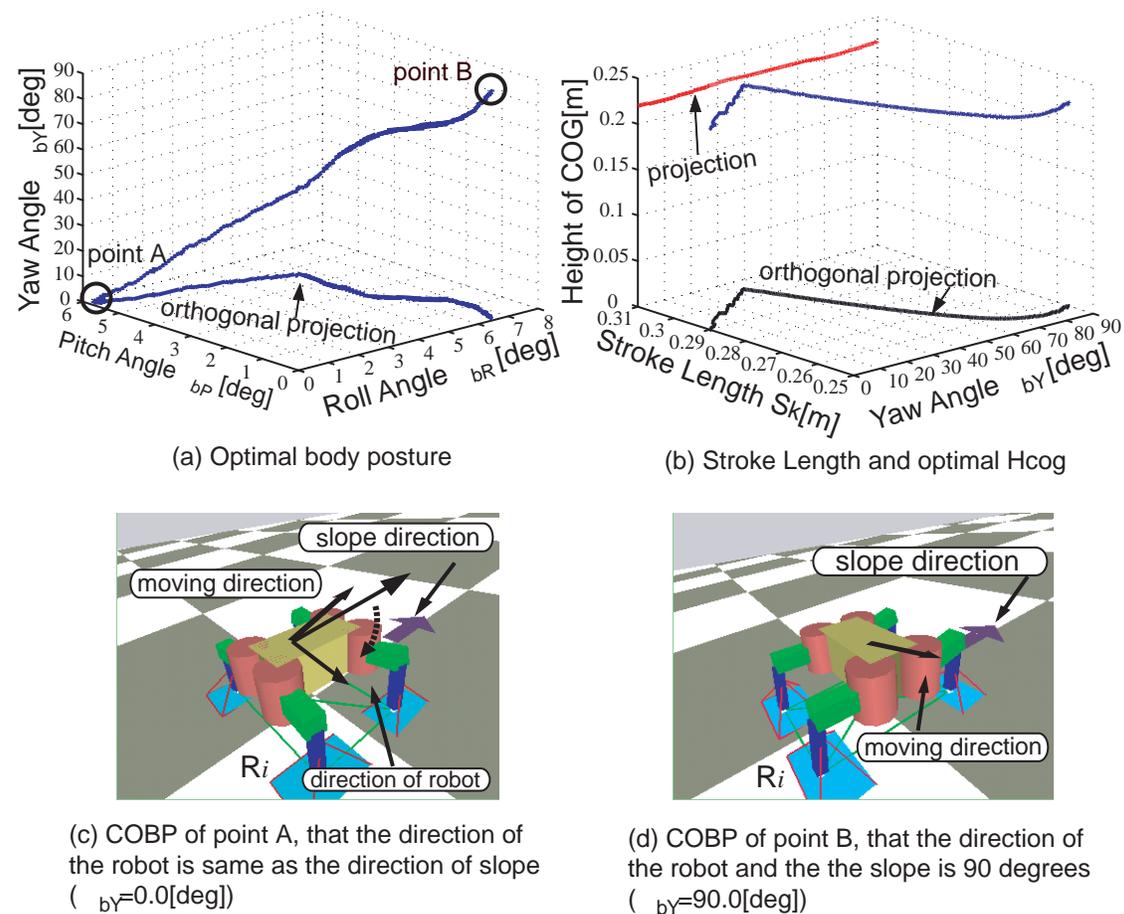


Figure 4.7: COG-correspondent optimal body posture (COBP) of the specified moving direction

クロール歩容での指定方向への移動では、一定の移動方向に対して最大移動速度（最大ストローク長）が取れる重心高さと姿勢を求める．具体的な例として、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．Fig.4.7 に示すように、ロボットから見た傾斜面の方向角度  $\psi_{bY}=35.0[\text{deg}]$  となったとき、移動方向がほぼ長方形となっている脚可動範囲の対角線と一致するため、ストローク長が最大となっていることが分かる．ここで、Fig.4.7(a) に示す点 A はロボットの方向が傾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傾斜面の傾斜方向が  $90$  度となる ( $\psi_{bY}=90.0[\text{deg}]$ ) 場合の OCBP である．点 A,B の最適解を Table 4.4 に示す．

## 4.4.2 任意方向のクロール歩容

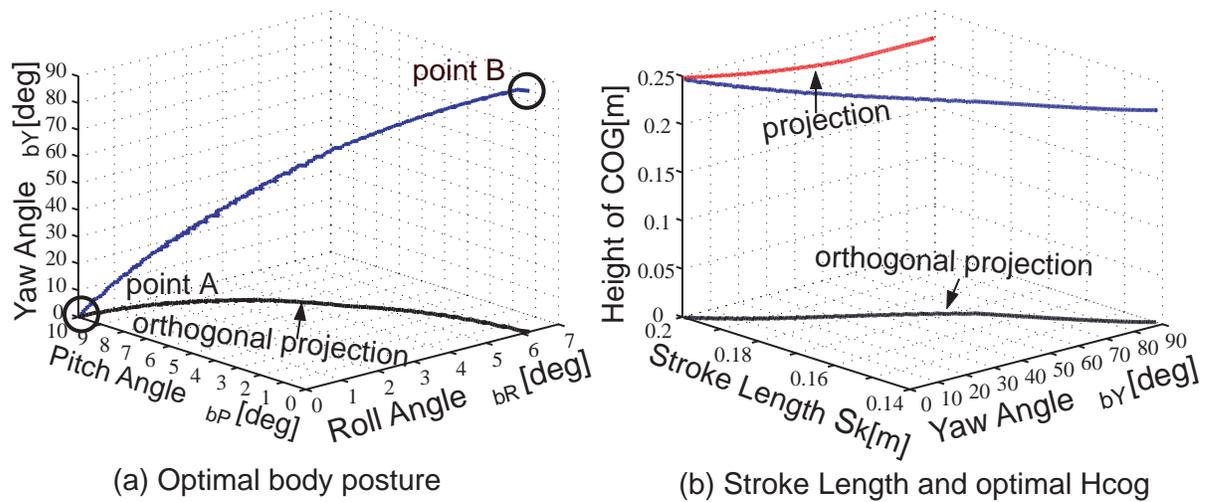


Figure 4.8: COBP of the arbitrary moving direction

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、最大ストローク長が取れる重心高さや姿勢である。即ち、全ての方向に対して4つの脚のうち、出し得るストローク長の最小値が最も大きく取れる重心高さや姿勢を最適解とする。Fig.4.8に示すように、 $\psi_{bY}=0.0[\text{deg}]$ からYaw角が増えるにつれ、出し得るストローク長が減少する一方である。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ストローク長が全体のネックとなっているためと考えられる。Fig.4.8(a)に示す点Aでは、脚基準位置が傾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クロール方向のストローク長がほぼ長方形となっている脚可動範囲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、脚基準位置のシフトによるYクロール方向への影響が最も大きく、このときのストローク長が最小となっていることが分かる。

## 4.4.3 循環歩容

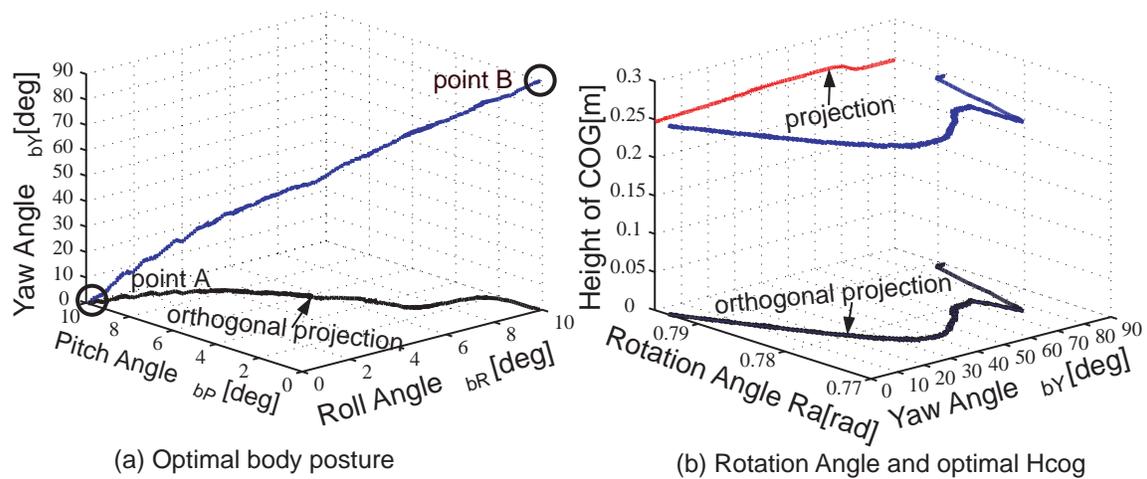


Figure 4.9: COBP of the rotation gait

Table 4.4: COBP of special point A,B

| Gait Pattern                              | Point | $b_Y$ [deg] | $b_R$ [deg] | $b_P$ [deg] | Hcog [m] |
|---|-------|-------------|-------------|-------------|----------|
| Crawl gait for specified moving direction | A     | 0           | 0.1         | 5.8         | 0.220    |
|   | B     | 90          | 6.6         | 0.1         | 0.223    |
| Crawl gait for arbitrary direction        | A     | 0           | 0.0         | 10.0        | 0.247    |
|   | B     | 90          | 6.2         | 0.0         | 0.221    |
| Rotation gait                             | A     | 0           | 0.0         | 9.9         | 0.247    |
|   | B     | 90          | 10.0        | 0.1         | 0.247    |

循環歩容ではその場の旋回について最大旋回角速度が取れる重心高さと姿勢を求める。Fig.4.9 に示すように、 $\psi_{bY}=0.0[\text{deg}]$  から  $Yaw$  角が増えるにつれ、旋回角速度が減少する。ロボットから見た傾斜面の方向角度  $\psi_{bY}=40.0[\text{deg}]$  の場合、旋回角速度が最小となり、その後、 $Yaw$  角の増加にともなって旋回角速度が再び増大することが分かる。この対称の変化では、脚可動範囲がほぼ長方形となっているためと考えられる。

## 4.5 重心高さを生かした最適な胴体姿勢を有する歩容遷移

傾斜面におい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)を有しながら全方位静歩行を実現するため、連続的な歩容遷移を以下の手順で実現する。

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、新しい歩容に対してCOBPを求め、新しい重心高さと胴体姿勢の脚可動範囲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に動かしていき、次に示す変更の条件を満たす遊脚期間で 新しい重心高さと胴体姿勢へ変更 することで、連続的な歩容遷移を実現する。

### 変更の条件

1. 遊脚期間中で行うこと、
2. 安定余裕が0より大きいこと、
3. 全ての脚が新しい重心高さと胴体姿勢の脚可動範囲内に存在すること。

ここで、脚を新しい位置へ動かしていく脚移動順序、新しい重心高さと胴体姿勢へ変更の時刻は歩容遷移パターンに依存する。脚移動順序は水平面、傾斜面の連続的な歩容遷移の脚移動順序と同じである。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、Fig.4.10-Fig.4.15に示すように(1)クロールからクロール、(2)クロールから循環、(3)循環からクロール、(4)循環から循環の4つに分類できる。図中、UはStep 1で遊脚化する脚、Cは脚Uの対角にある脚、(1)と(3)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、(2)と(4)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。次に歩容遷移を安定かつ連続に、COBPを有する歩容遷移の脚移動順序と変更の時刻について述べる。

## 4.5.1 クロール歩容からクロール歩容への遷移

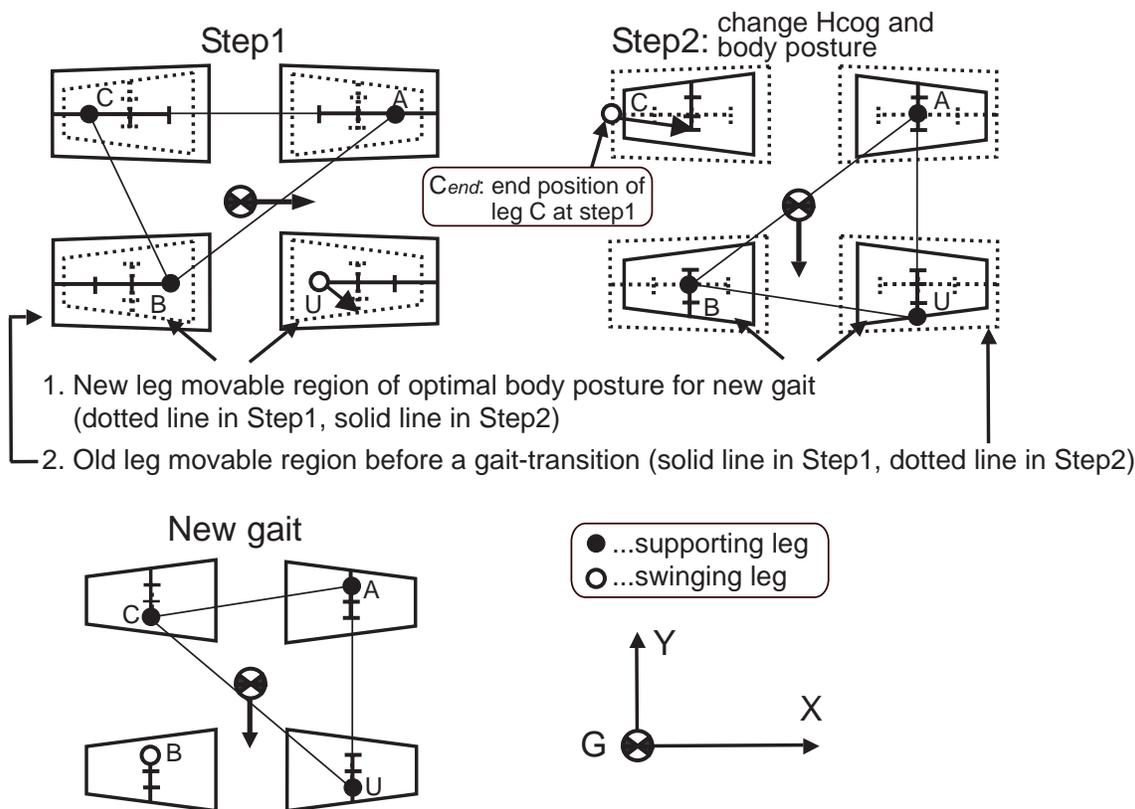


Figure 4.10: Gait-transition case 1 from crawl gait to crawl gait with COBP

クロール歩容からクロール歩容への遷移では遷移一步目の遊脚が遷移後の進行方向に対して前脚となる場合は Case 1, 後脚となる場合は Case 2 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 における脚可動範囲を示し、その内部にある点線は新しい歩容の COBP における新しい脚可動範囲である。ここで、Case 1, Case 2 とともに歩容遷移開始 1 歩目、Step 1 で重心高さまたは姿勢の変更を行うと、脚 C の終了位置  $C_{end}$  が新しい脚可動範囲内 (Fig.4.10 中の Step 1 の実線, Step 2 の点線を示している部分) に保証できないため、新しい重心高さや胴体姿勢への変更を行わない。変更の時刻はケースによって次のようになる。

Case 1: Step 2 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、変更の条件を満たしているため Step 2 で新しい重心高さや胴体姿勢への変更を行うことができる。Fig.4.10 の Step 2 に示すように、脚可動範囲を点線 (遷移前の COBP における脚可動範囲) から実線 (新しい COBP の脚可動範囲) へ変更した。

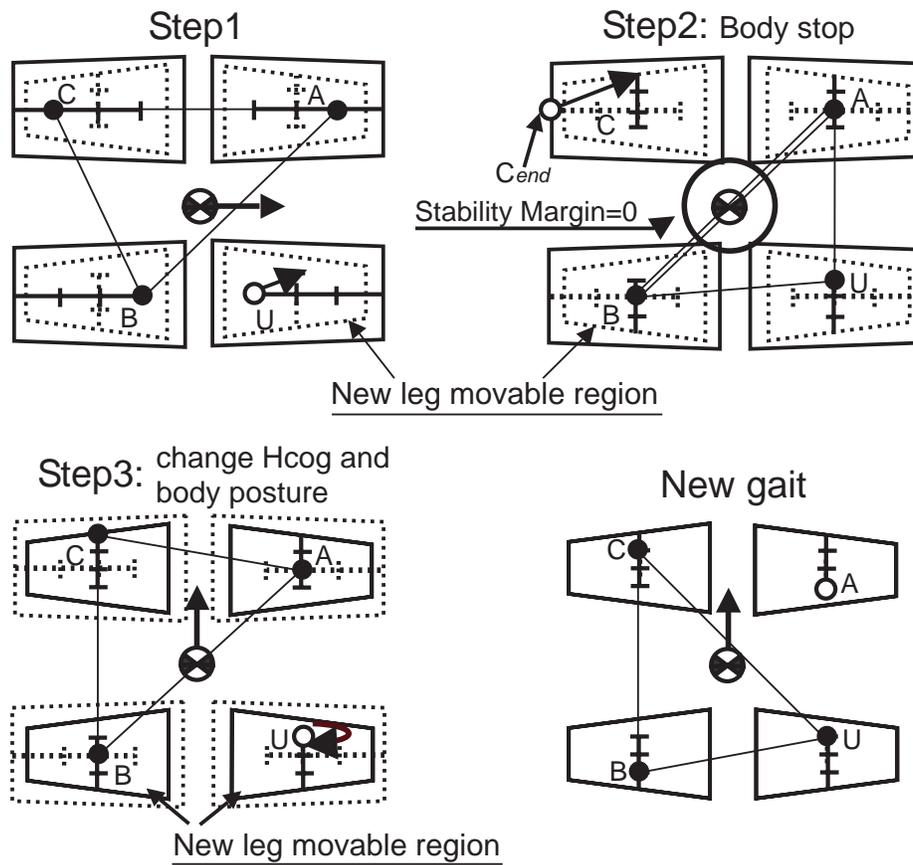


Figure 4.11: Gait-transition case 2 from crawl gait to crawl gait with COBP

Case 2: Step 2 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，新しい重心高さや胴体姿勢への変更を行わない．Step 3 では脚 A と B が基準位置にあり，脚 C が新しい歩容の脚位置にある．変更の条件を満たしたので，Step 3 で新しい重心高さや胴体姿勢への変更を行うことができる．

## 4.5.2 クロール歩容から循環歩容への遷移

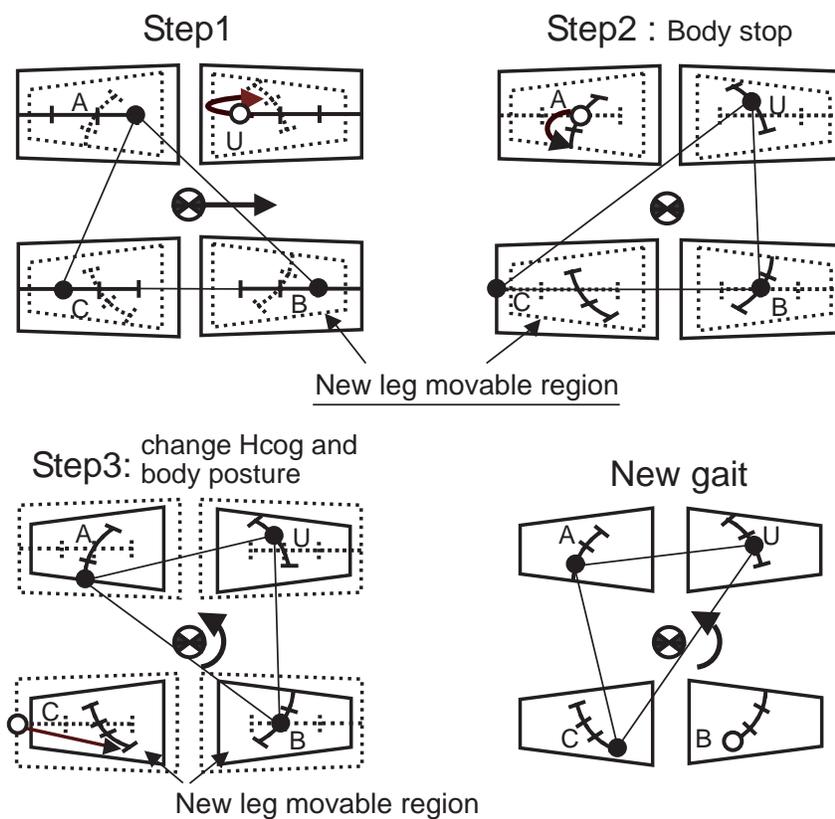


Figure 4.12: Gait-transition case 1 from crawl gait to rotation gait with COBP

クロール歩容から循環歩容への遷移では Fig.4.12 と Fig.4.13 に示すように、遷移 2 歩目、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。Case 1 の Step 2 では脚 C の旋回分の脚可動範囲が保証されないため、胴体の移動を遊脚時間 1 回分だけ停止させる必要がある。Case 2 の場合は Step 2 と Step 3 とともに脚 C の旋回分の脚可動範囲が保証されないため、胴体の移動を 2 回停止させる必要がある。Case 1, Case 2 とともに歩容遷移開始 3 歩目、脚 B が基準位置にあり、脚 U と A が次の歩容の脚位置にある。変更の条件を満たしているので Step 3 で新しい重心高さや胴体姿勢への変更を行うことができる。

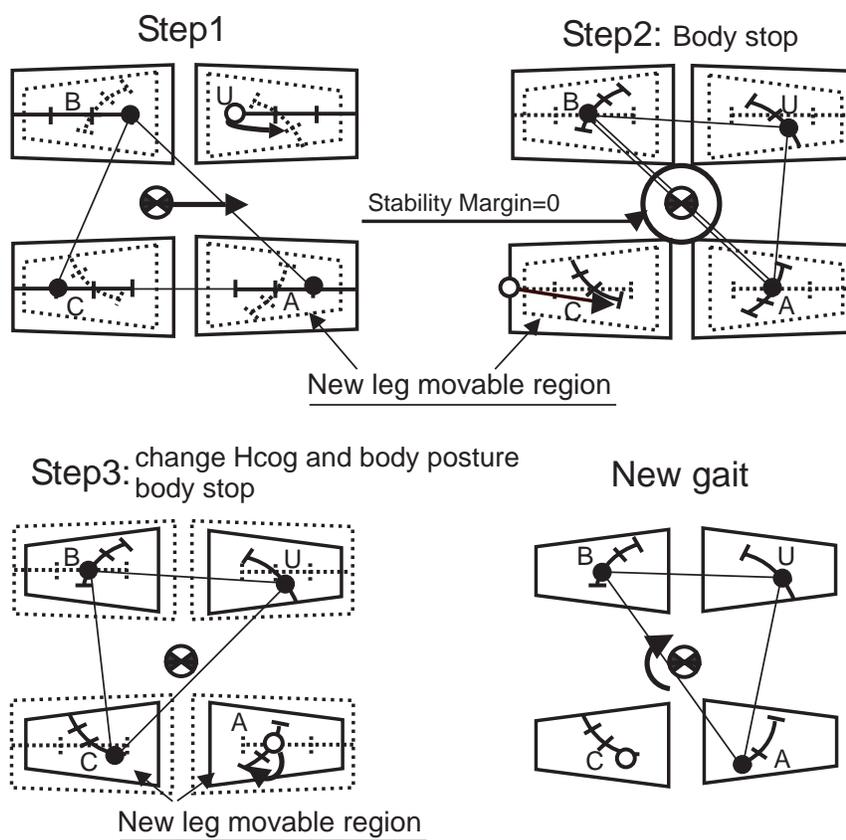


Figure 4.13: Gait-transition case 2 from crawl gait to rotation gait with COBP

## 4.5.3 循環歩容からクロール歩容への遷移

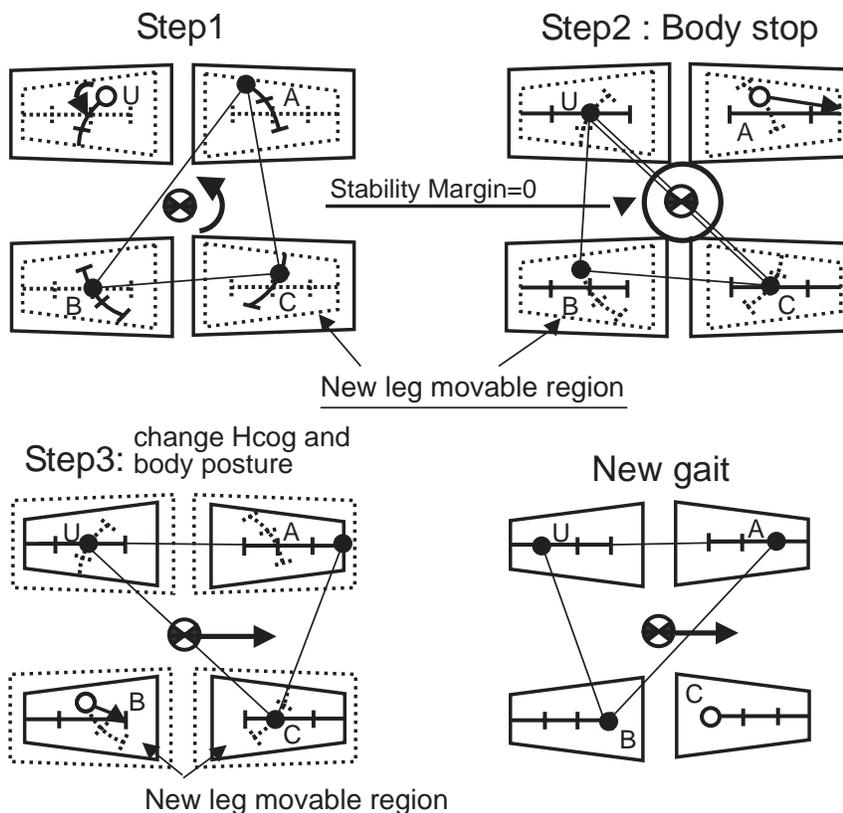


Figure 4.14: Gait-transition from rotation gait to crawl gait with COBP

循環歩容からクロール歩容への遷移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る。Fig.4.14 に示すように、Step 1 では変更の条件を保証できないため新しい重心高さや胴体姿勢への変更を行わない。Step 2 では脚 U と C が基準位置にあり、脚 A、B も遊脚化可能であるが、遷移後の進行方向に支持脚三角形を形成するため、脚 A を先に遊脚化する。このとき、胴体を遊脚時間 1 回分だけ停止させる必要がある。また、安定余裕が 0 であるため、新しい重心高さや胴体姿勢への変更を行わない。Step 3 では脚 U、C が基準位置にあり、脚 A が次の歩容の脚位置にある。変更の条件を満たしたので Step 3 で新しい重心高さや胴体姿勢への変更を行うことができる。

## 4.5.4 循環歩容から循環歩容への遷移

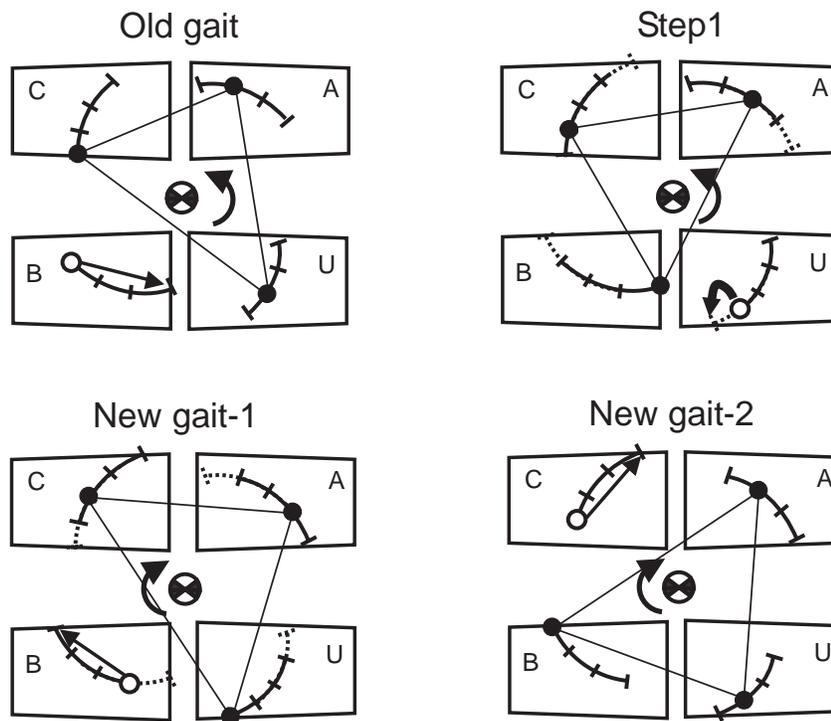


Figure 4.15: Gait-transition from rotation gait to rotation gait with COBP

循環歩容から循環歩容への遷移でもどのような脚配置からでも実行可能である。Fig.4.15 に示すように、循環歩容から循環歩容への歩容遷移を行う際、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を COBP を有する全方位静歩行の検討対象とするため、遷移前後の脚軌道の $2/3$ は同じ脚軌道となる。よって、Step 1 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。

## 4.6 おわりに

本章では傾斜面における4脚ロボットの安定性と移動速度を向上するために、まず、重心高さによる安定性と移動速度への影響について検討し、その安定性の検討に必要な3脚支持期間の安定性について詳細に述べた。

そして、積極的に重心高さと胴体姿勢を変更させ、傾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の誘導法について述べた。傾斜面における重心高さを生かした最適な胴体姿勢(COBP)とは、クロール歩容に対して任意の移動方向及び指定された方向、循環歩容に対してその場の旋回について、歩行中の安定性を考慮して導出した移動速度を最大にする重心高さと胴体姿勢であり、これらの歩容を組み合わせることによって4脚ロボットの全方位静歩行が実現可能である。

さらに、この重心高さを生かした最適な胴体姿勢を有しながら安定、かつ連続的な歩容遷移の実現手法について述べた。提案した手法では、重心高さを生かした最適な胴体姿勢を考慮した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。



# 第5章 歩行実験

## 目次

---

|       |                                    |     |
|-------|------------------------------------|-----|
| 5.1   | はじめに                               | 108 |
| 5.2   | 実験機材とシミュレーションの設定について               | 109 |
| 5.3   | 傾斜面上における全方位静歩行について                 | 112 |
| 5.3.1 | 胴体姿勢と重心高さを任意にさせた状態での歩容遷移           | 112 |
| 5.3.2 | 胴体姿勢による移動速度への影響                    | 119 |
| 5.3.3 | 重心高さによる安定性への影響                     | 123 |
| 5.4   | 最適な胴体姿勢による移動速度の向上について              | 125 |
| 5.4.1 | 移動方向指定のクロール歩容                      | 125 |
| 5.4.2 | 任意方向のクロール歩容                        | 126 |
| 5.4.3 | 循環歩容                               | 128 |
| 5.5   | 最適な胴体姿勢を有する歩容遷移について                | 129 |
| 5.5.1 | クロール歩容からクロール歩容への遷移                 | 129 |
| 5.5.2 | クロール歩容から循環歩容への遷移                   | 131 |
| 5.5.3 | 循環歩容からクロール歩容への遷移                   | 133 |
| 5.5.4 | 循環歩容から循環歩容への遷移                     | 134 |
| 5.6   | 重心高さを生かした最適な胴体姿勢による安定性と移動速度の向上について | 135 |
| 5.6.1 | 移動方向指定のクロール歩容                      | 135 |
| 5.6.2 | 任意方向のクロール歩容                        | 137 |
| 5.6.3 | 循環歩容                               | 138 |
| 5.7   | 重心高さを生かした最適な胴体姿勢を有する歩容遷移について       | 139 |
| 5.8   | 斜面全方位静歩行の実機実験                      | 142 |
| 5.8.1 | 胴体姿勢と重心高さを任意に維持した状態での斜面全方位静歩行の実機実験 | 142 |
| 5.8.2 | 重心高さを生かした最適な胴体姿勢を有する全方位歩行の実機実験     | 147 |
| 5.9   | おわりに                               | 152 |

---

## 5.1 はじめに

本章では、傾斜面上における4脚ロボットの安定性と移動速度を向上するために、第2章、第3章、および第4章において提案した手法の有効性をシミュレーション実験および実機実験により検証する。

最初に、まず第2章で提案する手法を用いて、胴体姿勢と重心高さを任意に維持した状態での斜面全方位静歩行の安定性を評価するため、歩容遷移をシミュレーション上で行い、安定性について検証する。また、胴体姿勢の変化による移動速度の向上、重心高さの変化による移動速度と安定性の向上について検証する。

第二に、第3章で誘導した最適な胴体姿勢を用いて、その最適な胴体姿勢を維持した連続的な歩容遷移手法をシミュレーション上で行い、提案手法の有効性を検証する。提案した手法を用いて、4脚ロボットは傾斜面上において、安定かつ連続に、移動速度を最大にする最適な胴体姿勢を維持した上で、全方位静歩行を実現していることを示す。

第三に、第4章で誘導した傾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を用いてシミュレーション実験を行う。積極的に重心高さと胴体姿勢を変更し、その重心高さを生かした最適な胴体姿勢を維持した連続的な歩容遷移手法の有効性を検証する。提案した手法を用いて、4脚ロボットは傾斜面上において、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を示す。

最後に、提案した傾斜面歩行手法を用いて実機での傾斜面歩行を行う。

以下、

第5.2節では、ここで行うシミュレーションの設定を説明する。

第5.3節では、胴体姿勢と重心高さを任意に維持した状態での斜面全方位静歩行の安定性について検証する。

第5.4節では、最適な胴体姿勢を維持した連続的な歩容遷移手法の有効性を検証する。

第5.5節では、積極的に重心高さと胴体姿勢を変更することによって移動速度と安定性の向上について検証する。

第5.6節では、重心高さを生かした最適な胴体姿勢を維持した連続的な歩容遷移手法の有効性を検証する。

第5.7節では、胴体姿勢と重心高さを任意に維持した状態での斜面全方位静歩行、重心高さを生かした最適な胴体姿勢を有しながら連続的な歩容遷移手法を実機で検証する。

## 5.2 実験機材とシミュレーションの設定について

本研究のシミュレーション実験ではロボットの操縦に OpenGL を用いて作成した GUI 的な操縦パネルを使用する。マウスで進行方向ボタンや旋回ボタンをクリックしてロボットを操縦する。Fig.5.1 はシミュレーション画面である。実際の実機ロボットは Fig.5.2 に示す普及型 4 脚ロボット TITAN-VIII を用いる。シミュレーションの各パラメータは TITAN-VIII の仕様を用いる。TITAN-VIII は文部省科学研究補助金重点領域研究「知能ロボット」の一環として汎用，ローコストな標準的な脚型ロボットの研究用プラットフォームとして開発されたものである。TITAN-VIII の仕様概要を Table 5.1 に示す。

Table 5.1: Spec of Quadruped robot

|                          |                                |
|--------------------------|--------------------------------|
| <i>Robot Size</i>        | 0.40× 0.65× 0.25[m]            |
| <i>Leg</i>               | 4                              |
| <i>Degree of Freedom</i> | 12(3DOF×4legs)                 |
| <i>Weight of Body</i>    | ≥ 20[kg]                       |
| <i>Movable Weight</i>    | ≤ 7[kg]                        |
| <i>Actuator</i>          | DC Servomotor ( 50[W] ) × 12   |
| <i>Motor Driver</i>      | Titech Robot Driver Ver.2 × 12 |
| <i>Sensor</i>            | Potentiometer(all joint) × 12  |
| <i>Power</i>             | DC24[V]                        |

Table 5.2: Parameter of Simulation

|   |                           |
|---|---------------------------|
| <i>Robot Size (standard postuer) [mm]</i>   | 400(W)× 600(L)× 250(H)[m] |
| <i>Leg movable area (basal plane) [mm]</i>  | 300(W)× 200(L)            |
| <i>Leg movable area (height) [mm]</i>   | 160(Top), -140(Bottom)    |
| <i>Inclination angle of slope (<math>\psi</math>) [deg]</i>                       | 10.0                      |
| <i>Initial value of <math>S_{hor}</math> [m]</i>                                  | 0.2                       |
| <i>MInimum average value of <math>S_{NE}</math> (<math>S_{NAmin}</math>) [mm]</i> | 0.128                     |
| <i>MInimum stroke (<math>Stroke_{min}</math>) [m]</i>                             | 0.001                     |
| <i>Swining leg time [s]</i>   | 1.0                       |
| <i>Duty factor (<math>\beta</math>)</i>   | 0.75                      |
| <i>One period [s]</i>   | 4.0                       |

脚機構はリンクとワイヤを組み合わせた平面 2 自由度機構と，それ全体を回転

させる機構によって構成されており，合計3自由度を有する．この機構を駆動するワイヤは螺旋上にV字溝を切ったプーリにより巻き取られ，さらにプーリはDCモータによって回される．

モータドライバには岡崎産業製 Titech Robot Driver Ver.2(PC-0121-2) を使用する．このモータドライバの位置制御モードを使用することにより，各関節に取り付けたポテンシオメータからの指令電圧に応じた関節角度を得ることができる．関節角度を指令する指令電圧はPCのISAバスに接続したDAコンバータから出力する．

歩容および脚先端軌道の計画はOSにRT-Linuxを搭載したPC/AT互換機(IntelMMX Pentium 200MHz, RAM 64MB)から行い，脚先端の軌道追従には分解速度法を用いる．また操縦にはOpenGLを用いて作成したGUI的な操縦パネルを使用し，マウスで進行方向ボタンや旋回ボタンをクリックしてロボットを操縦する．

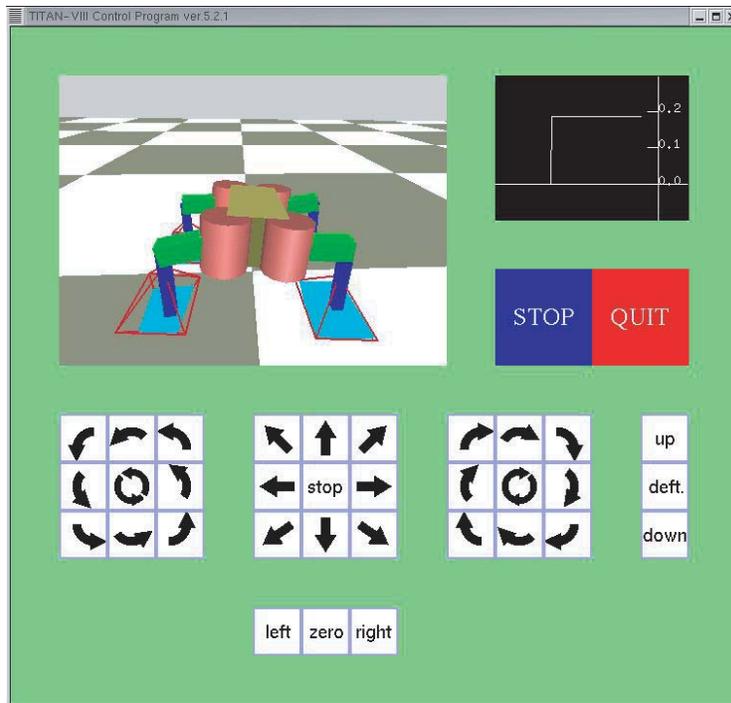


Figure 5.1: The GUI operation panel screen by OpenGL

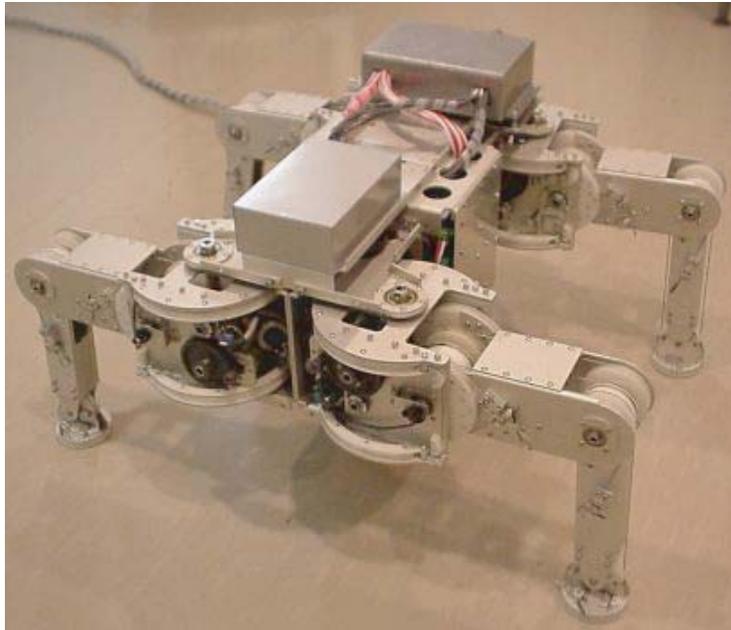


Figure 5.2: Real roboto TITAN-VIII

## 5.3 傾斜面における全方位静歩行について

本節では、傾斜面における4脚ロボットの全方位静歩行についてシミュレーション実験によって検討する。

まず、シミュレーション実験によって、胴体姿勢と重心高さを任意にさせた状態での歩容遷移を行う。

次に、シミュレーション実験によって、4脚ロボットの移動速度が脚可動範囲と脚位置シフト量がトレードオフの関係であることを考慮し、傾斜面上において移動速度を最大にする最適な胴体姿勢が存在することを検証する。

最後に、シミュレーション実験によって、重心高さを積極的に変更することによって脚可動範囲が大きくなったり、脚基準位置のシフト量が小さくなったりすることで移動速度の向上と安定性の向上に有効に利用できることを検証する。

### 5.3.1 胴体姿勢と重心高さを任意にさせた状態での歩容遷移

クロール歩容と循環歩容に基づく傾斜面における胴体姿勢と重心高さを任意にさせた状態での歩容遷移手法を検証するため、以下のようなシミュレーション実験を行った。

- クロール歩容からクロール歩容への遷移 (Case 1, Case 2)
- クロール歩容から循環歩容への遷移 (Case 1, Case 2)
- 循環歩容からクロール歩容への遷移
- 循環歩容から循環歩容への遷移

歩行する傾斜面は傾斜角  $\psi_s=5.0[\text{deg}]$  とする。傾斜面方向  $\psi_z=60.0[\text{deg}]$  にて行う。

傾斜面  $\psi=5.0[\text{deg}]$  , 胴体姿勢が胴体 Roll 角  $\psi_{bR}=5.0[\text{deg}]$  , 胴体 Pitch 角  $\psi_{bP}=5.0[\text{deg}]$  , 胴体 Yaw 角  $\psi_{bY}=60.0[\text{deg}]$  の時の各歩容遷移においてシミュレーションを行い、安定余裕について検討する。

歩行経路を Fig.5.4 ~ Fig.5.14 までの (a) に、安定余裕のグラフを Fig.5.4 ~ Fig.5.14 までの (b) に示す。

シミュレーションの結果から見ると、Fig.5.4 ~ Fig.5.14 のいずれの歩容遷移中および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。

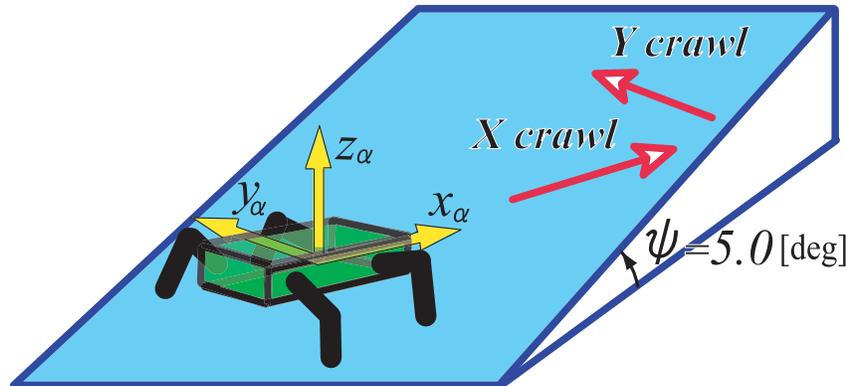


Figure 5.3: Walking image for gait-transition from X-crawl to Y-crawl (case 1)

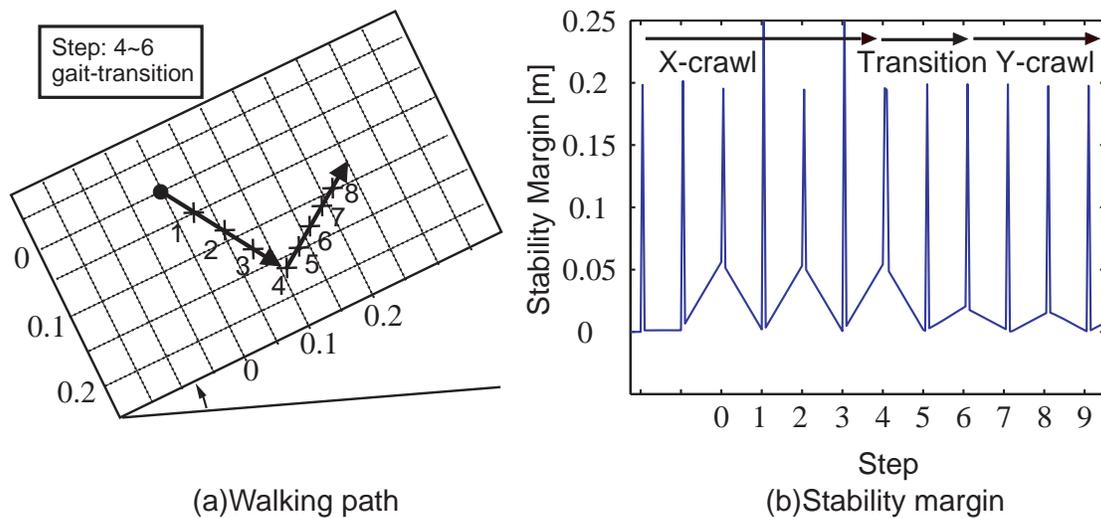


Figure 5.4: Walking path of COG and corresponding stability margin for the gait-transition from crawl gait to crawl gait (case 1)

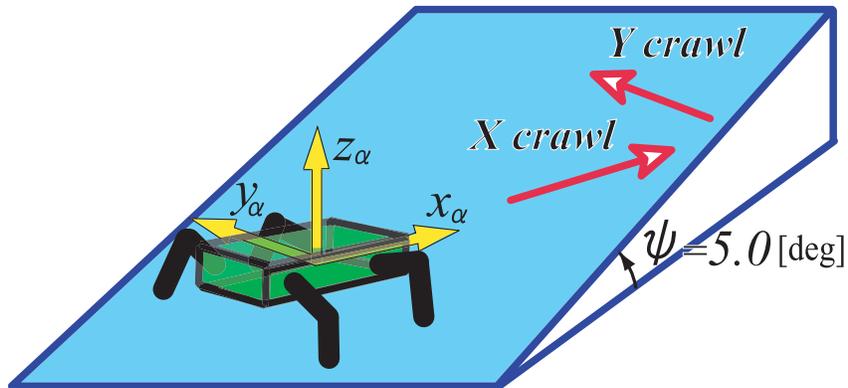


Figure 5.5: Walking image for gait-transition from X-crawl to Y-crawl (case 2)

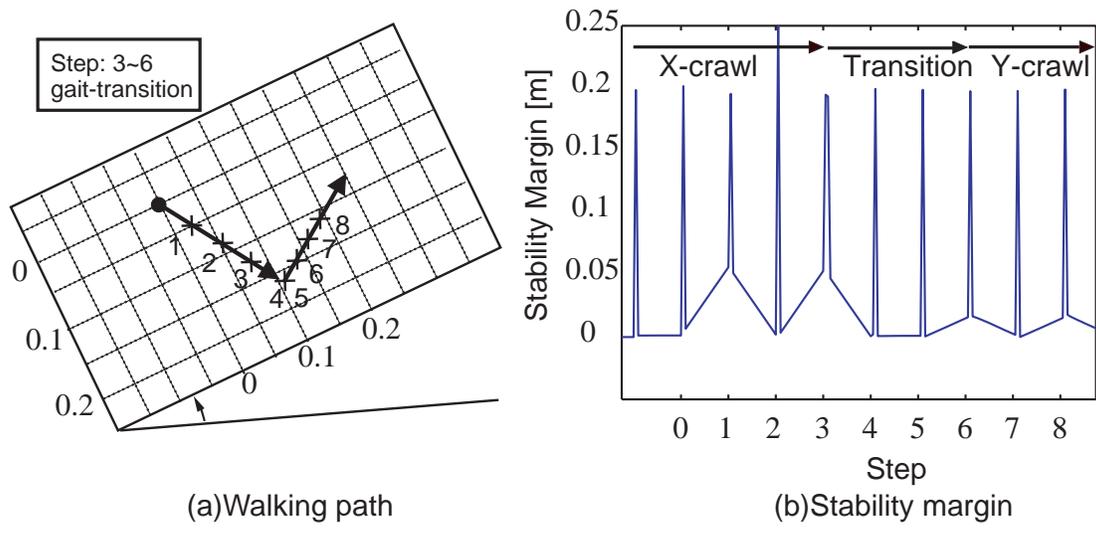


Figure 5.6: Walking path of COG and corresponding stability margin for the gait-transition from crawl gait to crawl gait (case 2)

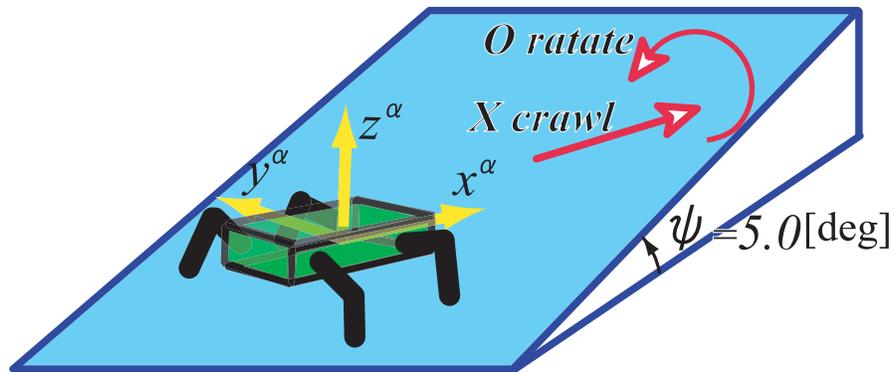


Figure 5.7: Walking image for gait-transition from X-crawl to rotation (case 1)

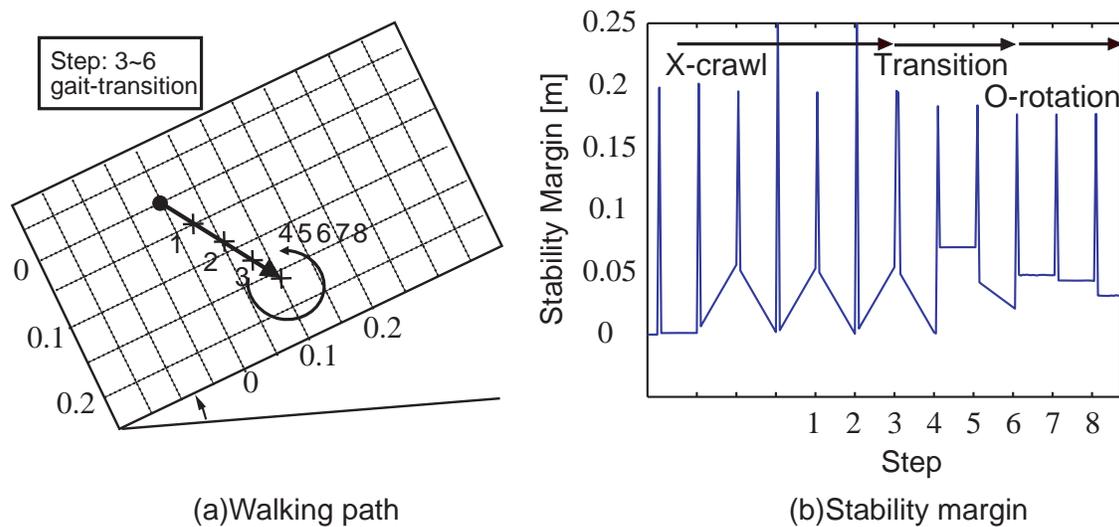


Figure 5.8: Walking path of COG and corresponding stability margin for the gait-transition from crawl gait to rotation gait (case 1)

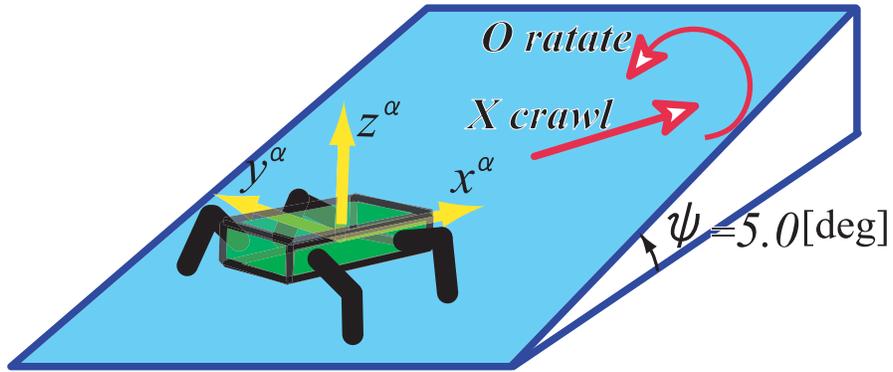


Figure 5.9: Walking image for gait-transition from X-crawl to rotation (case 2)

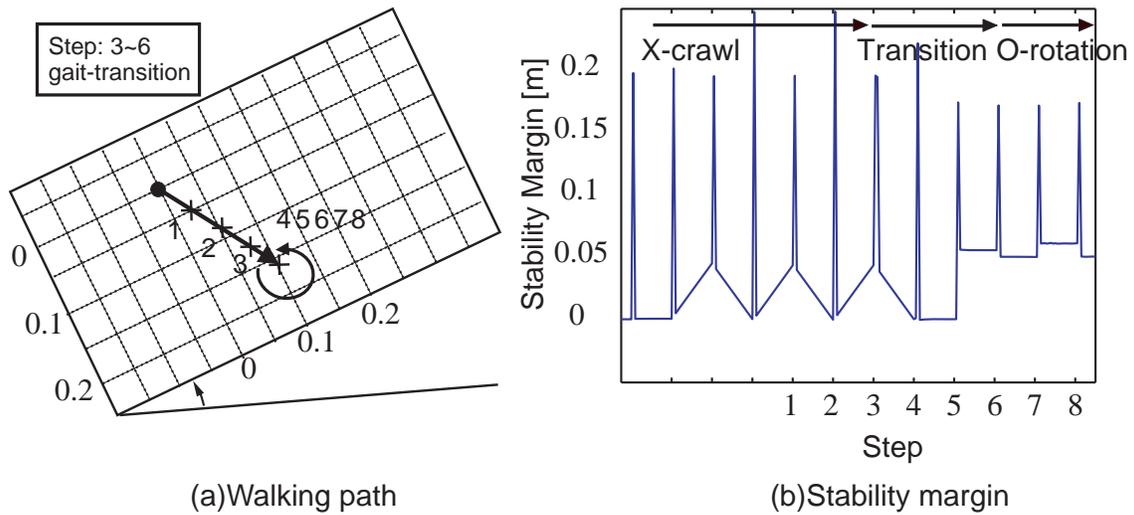


Figure 5.10: Walking path of COG and corresponding stability margin for the gait-transition from crawl gait to rotation gait (case 2)

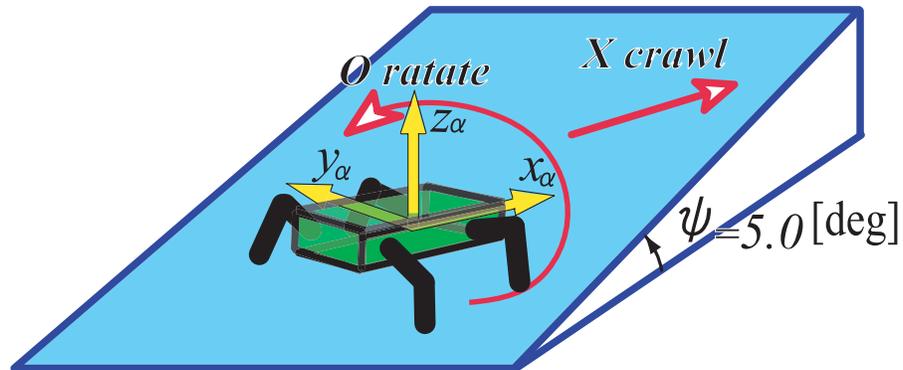


Figure 5.11: Walking image for gait-transition from rotation to X-crawl

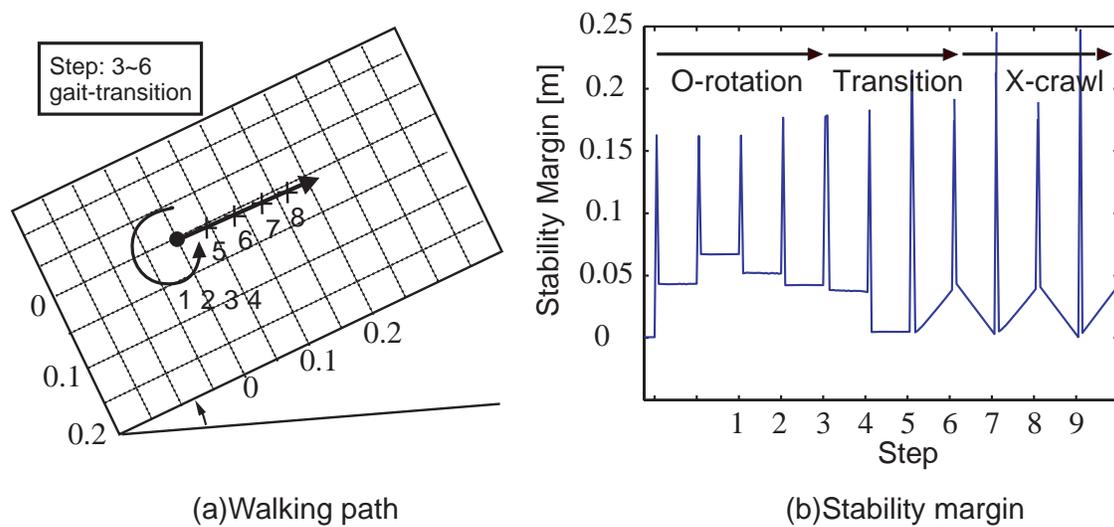


Figure 5.12: Walking path of COG and corresponding stability margin for the gait-transition from rotation gait to crawl gait

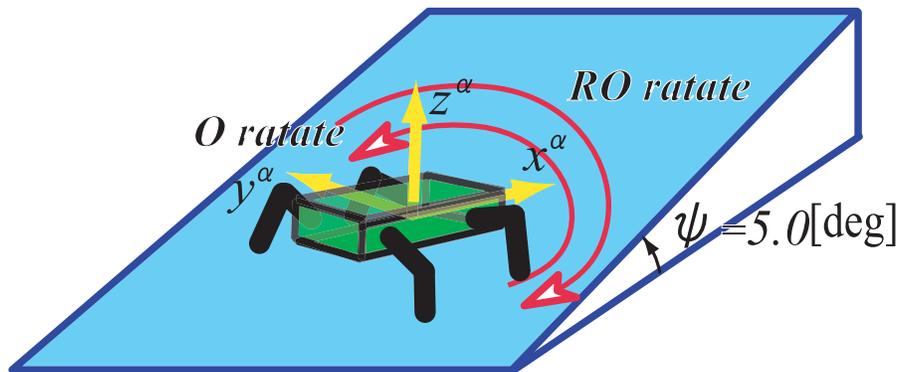


Figure 5.13: Walking image for gait-transition from rotation to rotation

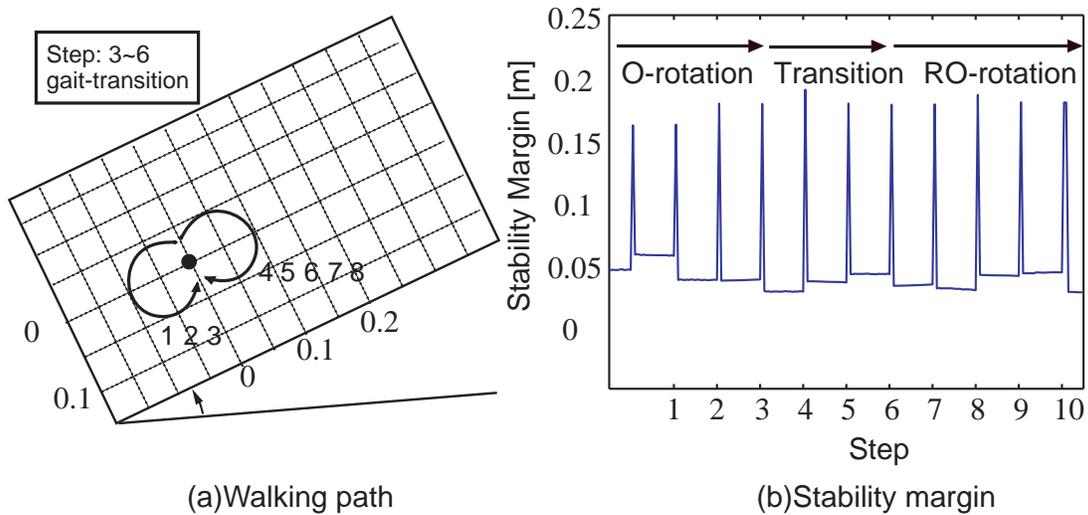


Figure 5.14: Walking path of COG and corresponding stability margin for the gait-transition from rotation gait to rotation gait

## 5.3.2 胴体姿勢による移動速度への影響

次に胴体姿勢が歩行速度に与える影響について検証する．胴体姿勢角は一つだけ変化させ、他の角度は固定する．胴体姿勢角を  $0[\text{deg}]$  から脚基準位置がとれなくなるまで増加させ、胴体姿勢により歩行速度に影響が現れるかどうか検証する．本論文では

実験 (1) 傾斜角  $\psi=10.0[\text{deg}]$  , 胴体 Yaw 角  $\psi_{bY}=0.0[\text{deg}]$  , 胴体 Roll 角  $\psi_{bR}=0.0[\text{deg}]$  , 3つの角度を固定し、胴体 Pitch 角のみを変化させ X クロール歩容を行う実験

実験 (2) 傾斜角  $\psi=10.0[\text{deg}]$  , 胴体 Yaw 角  $\psi_{bY}=0.0[\text{deg}]$  , 胴体 Pitch 角  $\psi_{bR}=0.0[\text{deg}]$  と固定し、胴体 Pitch 角のみを変化させ Y クロール歩容を行う実験

の2つを行う．

Fig.5.15, Fig.5.16 が示すように、胴体姿勢が変化するに従って歩行速度も変化していくことが確認できた．Fig.5.15, Fig.5.16 とともに傾斜面と平行になった時、速度が大きく低下していることが判明した．これは胴体重心と斜面との距離が一定の高さであると設定されているからだと考えられる．胴体重心と斜面との鉛直距離が固定されていたため、胴体が斜面と平行になっているものの、水平面を歩行した時と同じ大きさの脚可動範囲を得られないという事態が発生する．

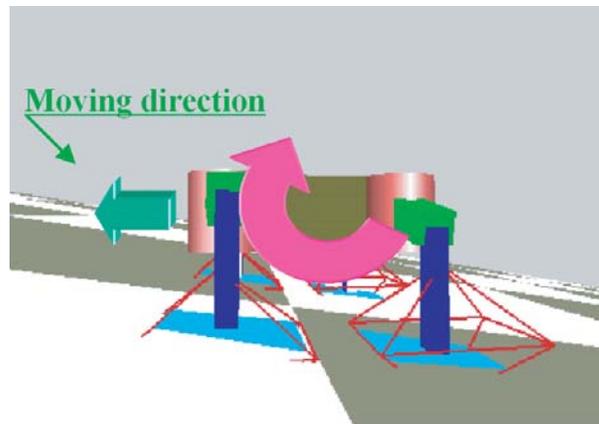
また、 $5.0[\text{deg}]$  より  $10.0[\text{deg}]$  の方が脚可動範囲が小さくなっていることから、角度が急になればなるほど、例え胴体と傾斜面が平行であっても脚可動範囲は狭くなることが考えられる．実際のグラフのデータを見ても、 $10.0[\text{deg}]$  を越えると速度が急に小さくなっている．このため胴体重心と斜面との距離が一定というのではなく、胴体と斜面が平行になった時、水平面と同様の大きさの脚可動範囲をとれるような手法が必要である．

また、Table.5.3 に最大速度とその時の角度、脚基準位置を確保することができなくなった角度を示す．

Table 5.3: Maximum moving speed, corresponding body posture and limiting angle to walk on slope

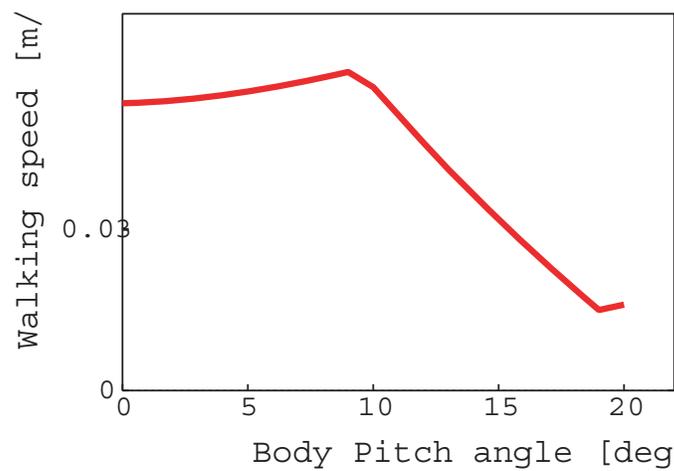
|            | Maximum moving speed [m/s] | Corresponding body posture [deg] | Limiting angle [deg] |
|------------|----------------------------|----------------------------------|----------------------|
| Exp. ( 1 ) | 0.0593                     | 9.4                              | 21.0                 |
| Exp. ( 2 ) | 0.0321                     | 9.5                              | 14.0                 |

実験 ( 1 ) の場合、最大速度を取った時の角度が  $9.4[\text{deg}]$  であり、実験 ( 2 ) の場合、最大速度を取った時の角度が  $9.5[\text{deg}]$  である． $10[\text{deg}]$  は胴体姿勢と傾斜面が平行な状態で、水平面と同じ大きさの脚可動範囲をとることができる角度である．しかし、実際は前に述べた理由により取れないため、 $10[\text{deg}]$  と  $9[\text{deg}]$  では、脚可



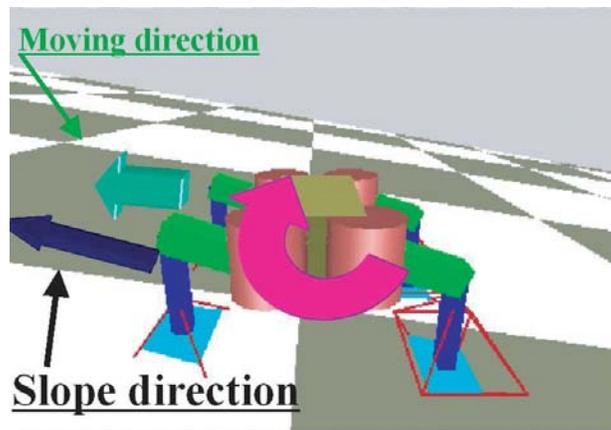
Body Pitch angle [deg]

(a) Changing body posture (Pitch)



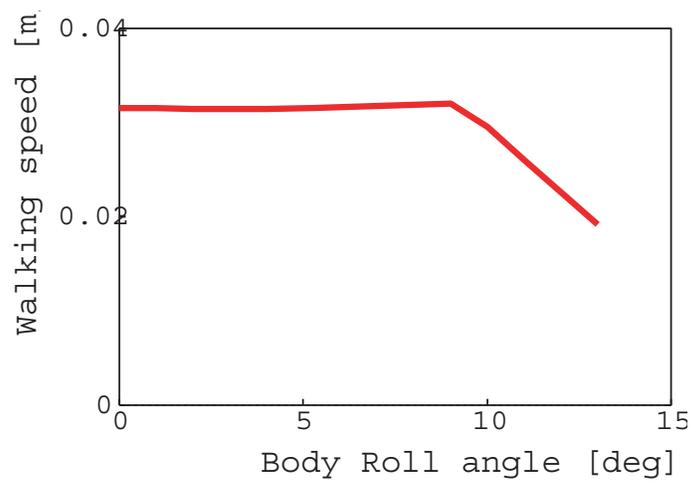
(b) Change of walking speed by body posture

Figure 5.15: Changing walking speed by rotated body state on slope direction  $\psi_{bY}=0.0[\text{deg}]$



Body Roll angle [deg]

(a) Changing body posture (Roll)



(b) Change of walking speed by body posture

Figure 5.16: Changing walking speed by rotated body state on slope direction  $\psi_{bY}=90.0[\text{deg}]$

---

動範囲の大きさがほぼかわらず，さらに脚位置シフト量では9[deg]より10[deg]の方が大きいため，速度が大きくなったと考えられる．

## 5.3.3 重心高さによる安定性への影響

重心高さによる安定性への影響を検証するために、次のシミュレーション実験を行った。

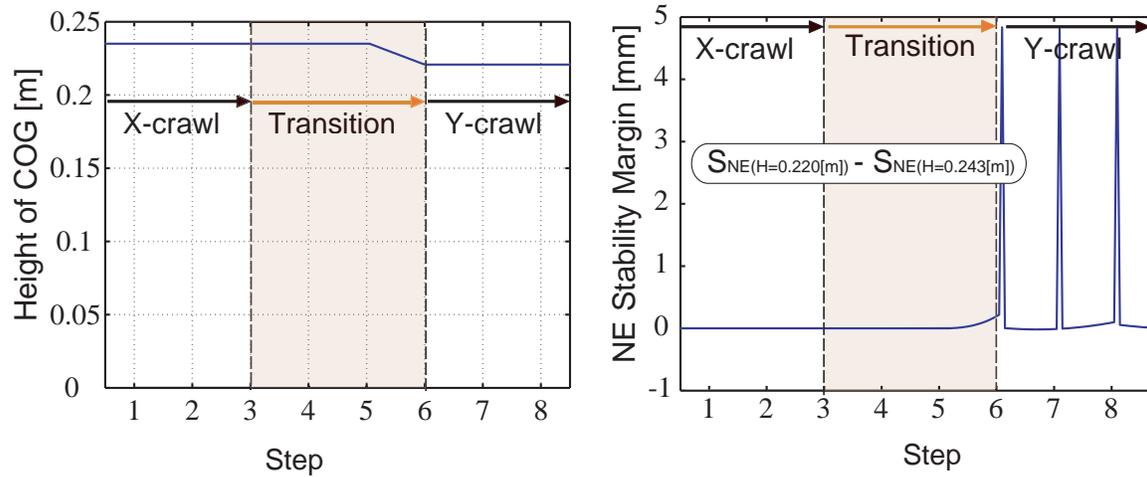


Figure 5.17: Influence on  $S_{NE}$  by changing the height of COG

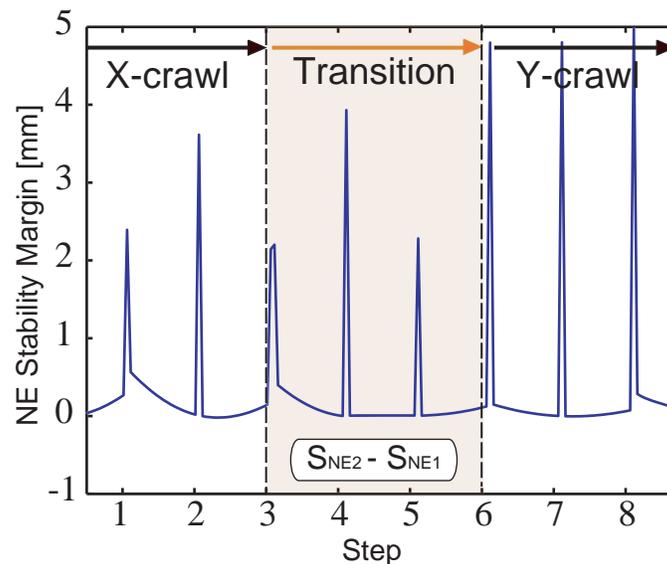


Figure 5.18: Compare  $S_{NE1}$  and  $S_{NE2}$

実験1: XクロールからYクロールへの歩容遷移 (Case2) . 指定移動方向  $Yaw=60[\text{deg}]$  のクロール歩容について、胴体姿勢を  $Roll=8.7[\text{deg}]$ ,  $Pitch=4.3[\text{deg}]$  固定し、Step3(5-6)で、胴体重心高さのみ  $h=0.243[\text{m}]$  から  $0.223[\text{m}]$  へ変更した。

Fig.5.17 に示したように，安定性の向上が安定余裕  $S_M$  では反映しないが NE 安定余裕で正しく評価することができ，安定性が高くなることが分かる．

実験 2: X クロールから Y クロールへの歩容遷移 (Case2)．遷移中，胴体姿勢のみ変更と重心高さと同時に変更の 2 つの実験を行い，安定性を比較する．

$S_{NE1}$ :  $Roll=8.7[\text{deg}], Pitch=4.3[\text{deg}], h=0.243[\text{m}]$  から  $Roll=7.8[\text{deg}], Pitch=5.6[\text{deg}], h=0.243[\text{m}]$  へ変更する．

$S_{NE2}$ :  $Roll=8.6[\text{deg}], Pitch=4.1[\text{deg}], h=0.243[\text{m}]$  から  $Roll=7.1[\text{deg}], Pitch=5.6[\text{deg}], h=0.220[\text{m}]$  へ変更する．

安定性の比較結果を ( $S_{NE1} - S_{NE2}$ ) Fig.5.18 に示し，安定性が高くなることが分かる．

## 5.4 最適な胴体姿勢による移動速度の向上について

傾斜面における最適な胴体姿勢を有する全方位静歩行による移動速度の向上について検証するため、本章では、胴体の重心高さが一定で、その姿勢としては水平、傾斜面と平行、誘導された最適な姿勢など、3つのパターンについて次の実験を行った。

実験 (1) 任意方向のクロール歩容

実験 (2) 移動方向指定のクロール歩容

実験 (3) 循環歩容

### 5.4.1 移動方向指定のクロール歩容

Table 5.4: Improvement in the moving speed by the optimal body posture (specified moving direction,  $\psi_{bY}=60[\text{deg}]$ )

| Body Posture         | Gait Type | bY<br>[deg] | bR<br>[deg] | bP<br>[deg] | Moving<br>Speed [m/s] | Increase<br>Rate [%] |
|----------------------|-----------|-------------|-------------|-------------|-----------------------|----------------------|
| Body horizontal      | X-Crawl   | 60          | 0.0         | 0.0         | 0.0376                | 0.0                  |
| Parallel to a slope  |           |             | 8.7         | 5.0         | 0.0631                | 67.8                 |
| Optimal body posture |           |             | 8.7         | 4.3         | 0.0657                | 74.7                 |
| Body horizontal      | Y-Crawl   | 60          | 0.0         | 0.0         | 0.0249                | 0.0                  |
| Parallel to a slope  |           |             | 8.7         | 5.0         | 0.0308                | 23.6                 |
| Optimal body posture |           |             | 7.8         | 5.6         | 0.0334                | 34.1                 |

具体的な例として、まず、ロボットの方向が  $\psi_{bY}=60[\text{deg}]$  の場合、X クロールと Y クロールの歩行シミュレーション実験を行った。Table 5.4 に示すように、移動速度を最大にする最適な胴体姿勢を有する歩行が大幅に速くなることが分かる。

次に、第 4.2 章で求めた移動方向指定のクロール歩容に対して、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。Table 5.19 に示すように、導出された最適な胴体姿勢における移動速度が大幅に向上していることが明らかである。

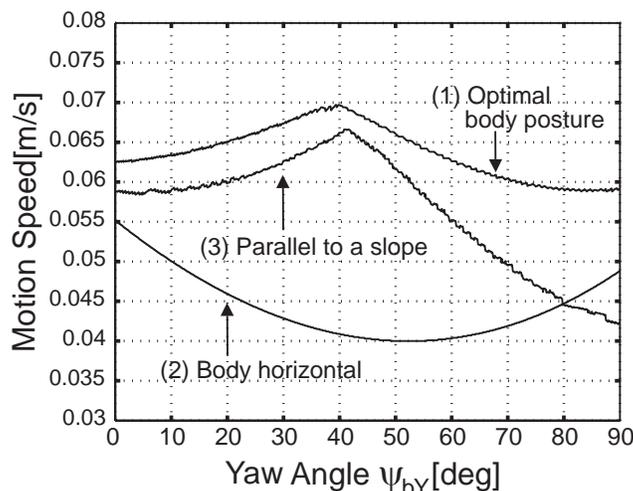


Figure 5.19: Motion speed in crawl gait while the specified moving direction is set as a 30[deg] angle of the  $X_a$ -axis (Fig.3.2)

#### 5.4.2 任意方向のクローल歩容

ロボットの方向が  $0 \leq \psi_{bY} \leq 90[\text{deg}]$  の範囲内で X クロールと Y クロールの歩行シミュレーション実験を行った。

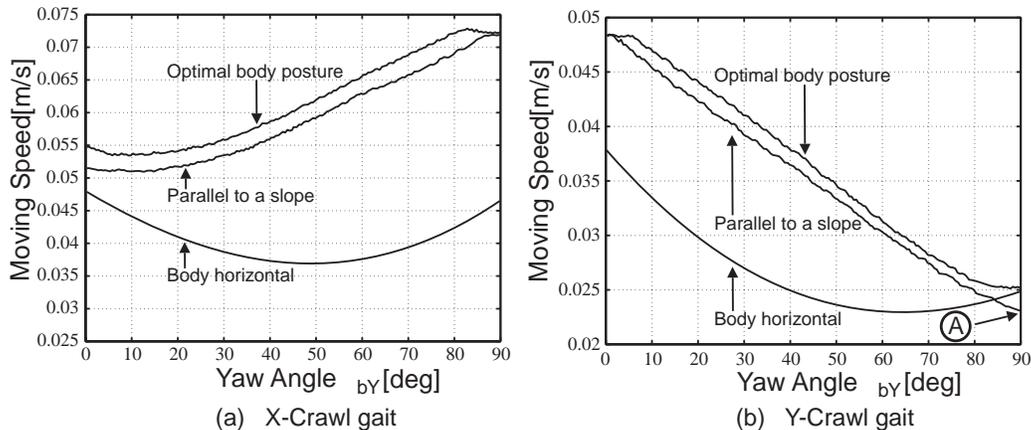


Figure 5.20: Verification of the improvement in moving speed (X, Y-crawl gait for arbitrary moving direction)

Fig.5.20 に示すように、最適な胴体姿勢を有するときロボットの移動速度が最も速いことが分かる。Table 5.5 は、ロボットの方向が0度と90度 ( $\psi_{bY}=0$  or  $90[\text{deg}]$ ) の場合における X クロールと Y クロールの実験結果と移動速度の向上率を示す。向上率としては胴体水平時の移動速度とを比較した結果である。この結果から見る

Table 5.5: Improvement in the moving speed by the optimal body posture (arbitrary moving direction)

| Body Posture         | Gait Type | bY [deg] | bR [deg] | bP [deg] | Moving Speed [m/s] | Increase Rate [%] |
|----------------------|-----------|----------|----------|----------|--------------------|-------------------|
| Body horizontal      | X-Crawl   | 0        | 0.0      | 0.0      | 0.0478             | 0.0               |
| Parallel to a slope  |           |          | 0.0      | 10.0     | 0.0515             | 7.7               |
| Optimal body posture |           |          | 0.0      | 9.4      | 0.0548             | 14.6              |
| Body horizontal      | X-Crawl   | 90       | 0.0      | 0.0      | 0.0465             | 0.0               |
| Parallel to a slope  |           |          | 10.0     | 0.0      | 0.0720             | 54.8              |
| Optimal body posture |           |          | 9.5      | 0.0      | 0.0723             | 55.5              |
| Body horizontal      | Y-Crawl   | 0        | 0.0      | 0.0      | 0.0373             | 0.0               |
| Parallel to a slope  |           |          | 0.0      | 10.0     | 0.0483             | 29.5              |
| Optimal body posture |           |          | 0.0      | 9.4      | 0.0487             | 30.6              |
| Body horizontal      | Y-Crawl   | 90       | 0.0      | 0.0      | 0.0247             | 0.0               |
| Parallel to a slope  |           |          | 10.0     | 0.0      | 0.0233             | -5.6              |
| Optimal body posture |           |          | 9.5      | 0.0      | 0.0253             | 2.4               |

と、単純に傾斜面と平行な胴体姿勢では脚可動範囲が大きくなる一方、脚基準位置のシフト量も大きくなるため、移動速度が最大になっていないことが分かる。しかし、ロボットの方向が90度でYクローリングを行なったとき、傾斜面と平行した胴体姿勢 ( Fig.5.20(b) に示すⒶ点 ) では移動速度の向上率が負になり、最適な胴体姿勢でもその向上率がわずかである。その理由としては、4脚ロボット TITAN-VIII の構造上、縦に比べて相対的に脚可動範囲の横幅が短く、傾斜面歩行時に脚基準位置のシフト量の増加が脚可動範囲の増加より上回ったためと考えられる。

## 5.4.3 循環歩容

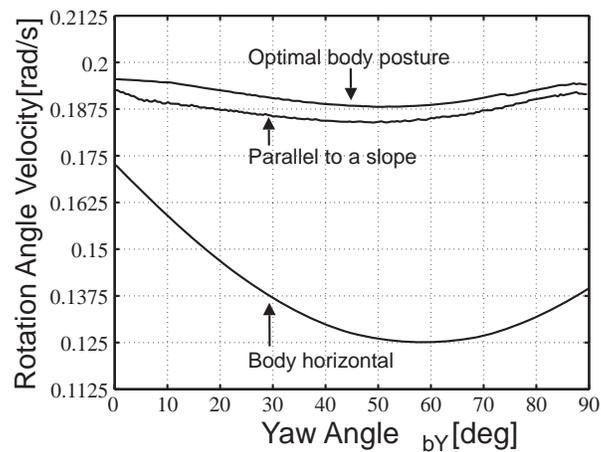


Figure 5.21: Verification of the improvement in moving speed (rotation gait)

ロボットが  $0 \leq \psi_{bY} \leq 90[\text{deg}]$  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。Fig.5.21 に示すように、最適な胴体姿勢を有する歩行の旋回角速度が最も速いことが分かる。また、ロボットの方向が  $\psi_{bY}=57[\text{deg}]$  前後の場合に、胴体姿勢を水平に維持したままでは移動が遅くなるのに対して、最適な胴体姿勢を有する歩行ではより速い旋回角速度で移動していることをも判明した。

以上から提案した手法を用いることで傾斜面における最適な胴体姿勢を有する全方位静歩行が最も速いことが検証された。

## 5.5 最適な胴体姿勢を有する歩容遷移について

本研究では指定移動方向のクローल歩容と循環歩容について最適な胴体姿勢を求め、各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、及び胴体姿勢の変化を Fig.5.22 ~ Fig.5.27 に示す。図中、(a) の番号 (1,2,...,8) はロボットの歩行ステップを示し、(b) と (c) 中の横軸の番号と一致する。Fig.5.22 と Fig.5.23, Fig.5.24 と Fig.5.25 では、胴体重心がそれぞれ同じ軌道を辿り、遷移パターンが異なる場合の結果を示している。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。

### 5.5.1 クローल歩容からクロール歩容への遷移

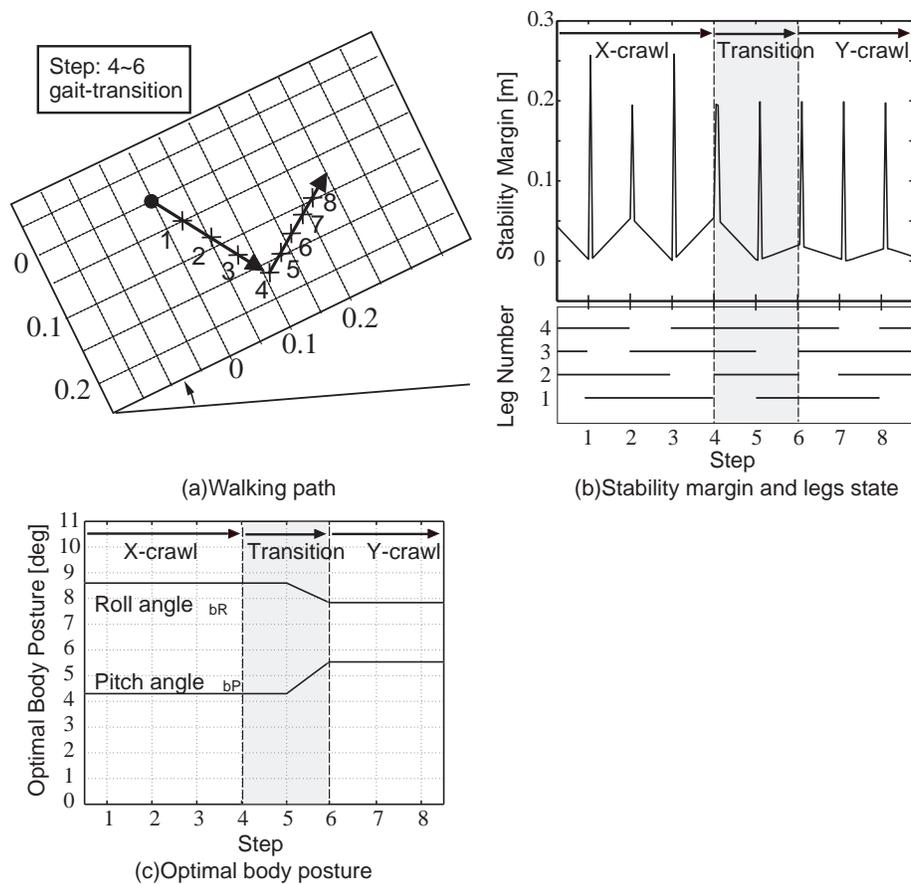


Figure 5.22: Walking path of COG, corresponding stability margin, legs state and optimal body posture for the gait-transition from crawl gait to crawl gait (case 1)

歩容遷移中にロボットの姿勢変更を説明する例として、まず、クロール歩容からクロール歩容 (Case 2)、ロボットの方向が  $\psi_{bY}=60[\text{deg}]$  の場合を考える。その

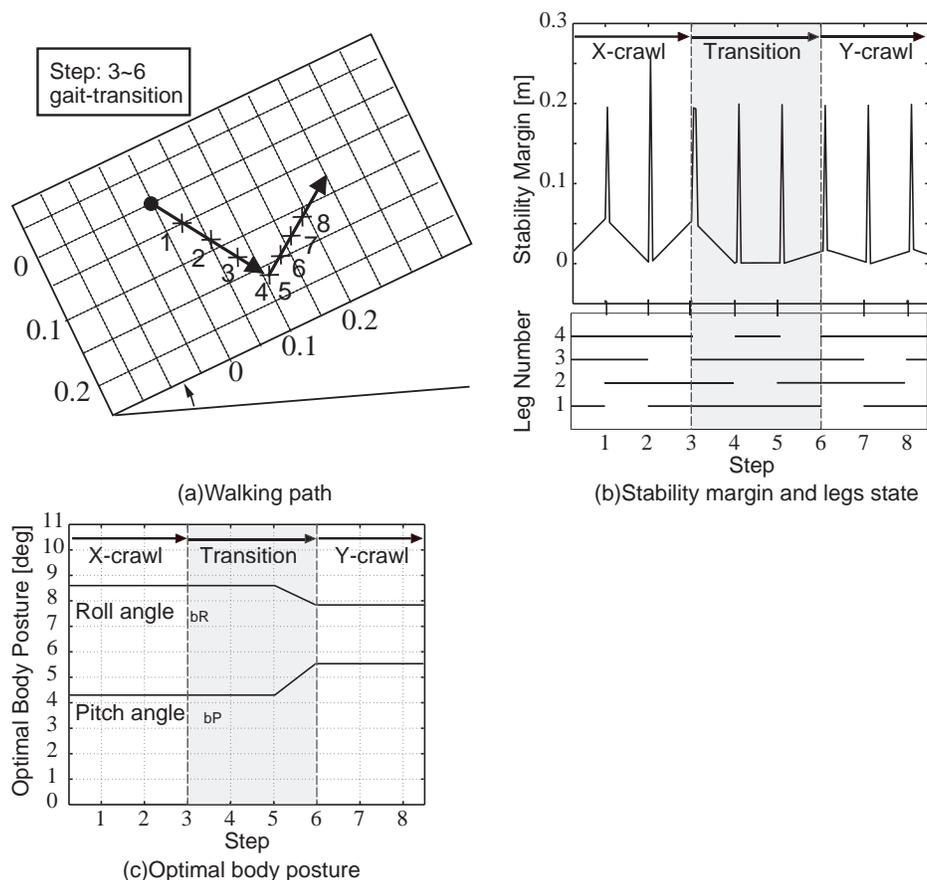


Figure 5.23: Walking path of COG, corresponding stability margin, legs state and optimal body posture for the gait-transition from crawl gait to crawl gait (case 2)

シミュレーション実験の結果を Fig.5.23 に示す．ステップ1,2ではロボットがXクロール歩容に対する最適な胴体姿勢 ( $\psi_{bR}=8.7[\text{deg}]$ ,  $\psi_{bP}=4.3[\text{deg}]$ ) 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では進行方向に支持脚三角形が形成されるのを待つため,胴体の移動を遊脚時間1回分だけ停止する．5ではクロールからクロール歩容への遷移 Case 2の Step 3に入り,このとき,新しい歩容のYクロール歩容における最適な胴体姿勢は  $\psi_{bR}=7.8[\text{deg}]$ ,  $\psi_{bP}=5.6[\text{deg}]$  であるため, Roll角を  $8.7[\text{deg}]$  から  $7.8[\text{deg}]$  へ, Pitch角を  $4.3[\text{deg}]$  から  $5.6[\text{deg}]$  へ姿勢変更を行う．6で歩容遷移が完了し,ステップ7,8ではYクロール歩容で直進することを示している．

## 5.5.2 クロール歩容から循環歩容への遷移

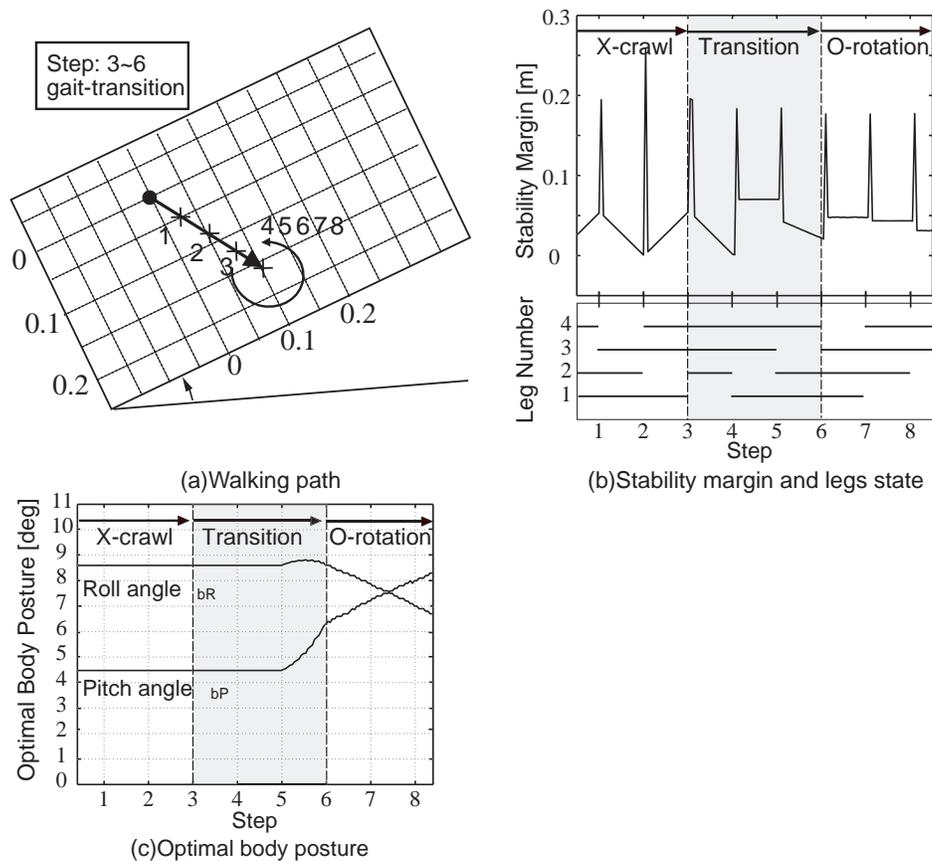


Figure 5.24: Walking path of COG, corresponding stability margin, legs state and optimal body posture for the gait-transition from crawl gait to rotation gait (case 1)

次に、クロール歩容から循環歩容への歩容遷移の場合を考える．そのシミュレーション実験の結果を Fig.5.24(case 1) , Fig.5.24(case 2) に示す．

ロボットの歩行ステップ (1~8) で説明すると、Case 1 の場合は、ステップ 1,2 は最適な胴体姿勢を有しながら循環歩容でその場の旋回を行っている．ここで、Fig.5.26(c) に示すように、ロボットの方向の変化に応じて、胴体姿勢が時々刻々に変化していることが分かる．3 では脚 2 (左後脚) が遊脚となり、歩容遷移を開始する．4 では進行方向に支持脚三角形が形成されるのを待つため、胴体の移動を遊脚時間 1 回分だけ停止する．5 では循環からクロール歩容への遷移の Step 3 に入る．このとき、ロボットの方向が  $\psi_{bY}=7.5[\text{deg}]$  となり、新しい歩容の X クロール歩容における、最適な胴体姿勢は  $\psi_{bR}=0.7[\text{deg}]$ ,  $\psi_{bP}=9.4[\text{deg}]$  であるため、Roll 角を  $1.6[\text{deg}]$  から  $0.7[\text{deg}]$  へ、Pitch 角を  $10.4[\text{deg}]$  から  $9.4[\text{deg}]$  へ姿勢変更を行う．6 で歩容遷移が完了し、ステップ 7,8 では X クロール歩容で直進することを示して

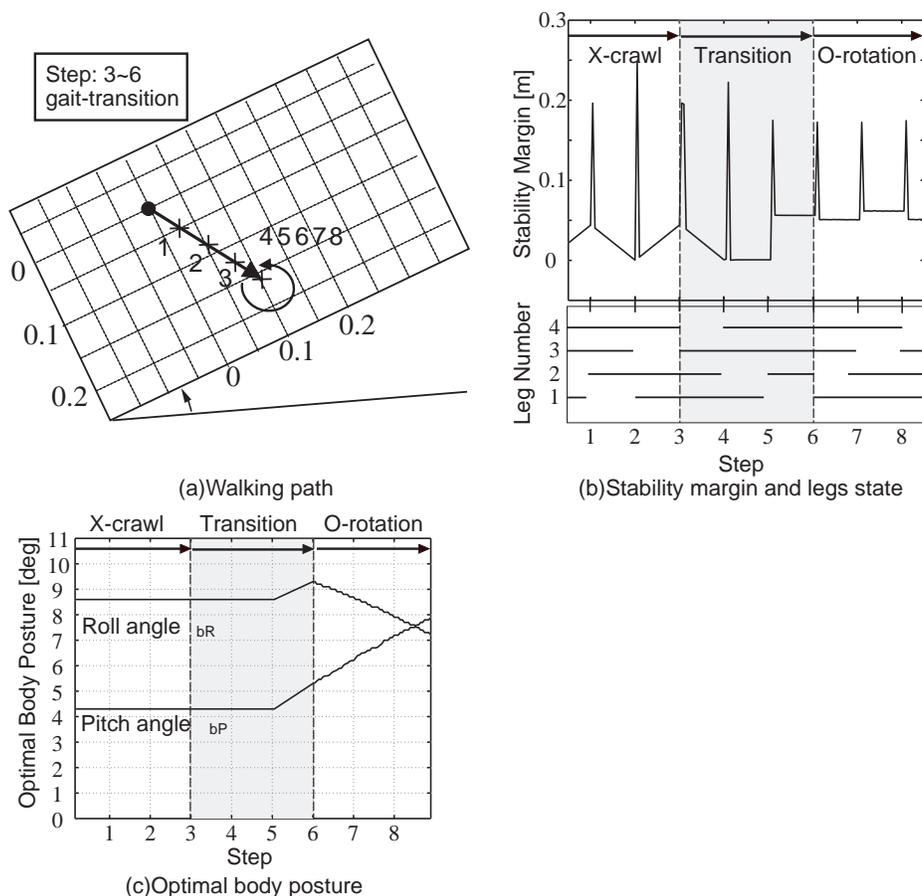


Figure 5.25: Walking path of COG, corresponding stability margin, legs state and optimal body posture for the gait-transition from crawl gait to rotation gait (case 2)

いる。

Case 2 の場合は、ステップ 1,2 は最適な胴体姿勢を有しながら循環歩容でその場の旋回を行っている。ここで、Fig.5.26(c) に示すように、ロボットの方向の変化に応じて、胴体姿勢が時々刻々に変化していることが分かる。3 では脚 2 (左後脚) が遊脚となり、歩容遷移を開始する。4 では進行方向に支持脚三角形が形成されるのを待つため、胴体の移動を遊脚時間 1 回分だけ停止する。5 では循環からクローラ歩容への遷移の Step3 に入る。このとき、ロボットの方向が  $\psi_{bY}=7.5[\text{deg}]$  となり、新しい歩容の X クローラ歩容における、最適な胴体姿勢は  $\psi_{bR}=0.7[\text{deg}]$ ,  $\psi_{bP}=9.4[\text{deg}]$  であるため、Roll 角を  $1.6[\text{deg}]$  から  $0.7[\text{deg}]$  へ、Pitch 角を  $10.4[\text{deg}]$  から  $9.4[\text{deg}]$  へ姿勢変更を行う。6 で歩容遷移が完了し、ステップ 7,8 では X クローラ歩容で直進することを示している。

## 5.5.3 循環歩容からクローल歩容への遷移

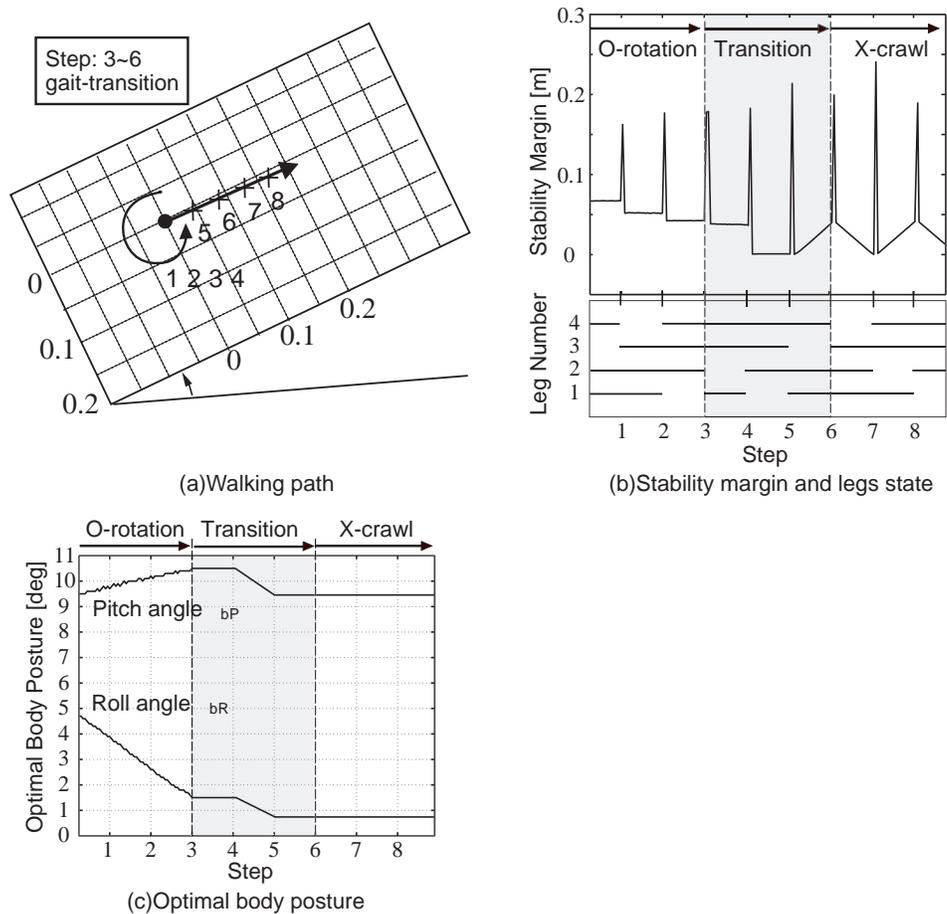


Figure 5.26: Walking path of COG, corresponding stability margin, legs state and optimal body posture for the gait-transition from rotation gait to crawl gait

次に、循環歩容からクローल歩容への歩容遷移の場合を考える．そのシミュレーション実験の結果を Fig.5.26 に示す．ロボットの歩行ステップ（1～8）で説明すると、ステップ1,2は最適な胴体姿勢を有しながら循環歩容でその場の旋回を行っている．ここで、Fig.5.26(c) に示すように、ロボットの方向の変化に応じて、胴体姿勢が時々刻々に変化していることが分かる．3では脚2（左後脚）が遊脚となり、歩容遷移を開始する．4では進行方向に支持脚三角形が形成されるのを待つため、胴体の移動を遊脚時間1回分だけ停止する．5では循環からクローल歩容への遷移のStep 3に入る．このとき、ロボットの方向が  $\psi_{bY}=7.5[\text{deg}]$  となり、新しい歩容のXクローल歩容における、最適な胴体姿勢は  $\psi_{bR}=0.7[\text{deg}], \psi_{bP}=9.4[\text{deg}]$  であるため、Roll角を  $1.6[\text{deg}]$  から  $0.7[\text{deg}]$  へ、Pitch角を  $10.4[\text{deg}]$  から  $9.4[\text{deg}]$  へ姿勢変更を行う．6で歩容遷移が完了し、ステップ7,8ではXクローल歩容で直進する

ことを示している。

#### 5.5.4 循環歩容から循環歩容への遷移

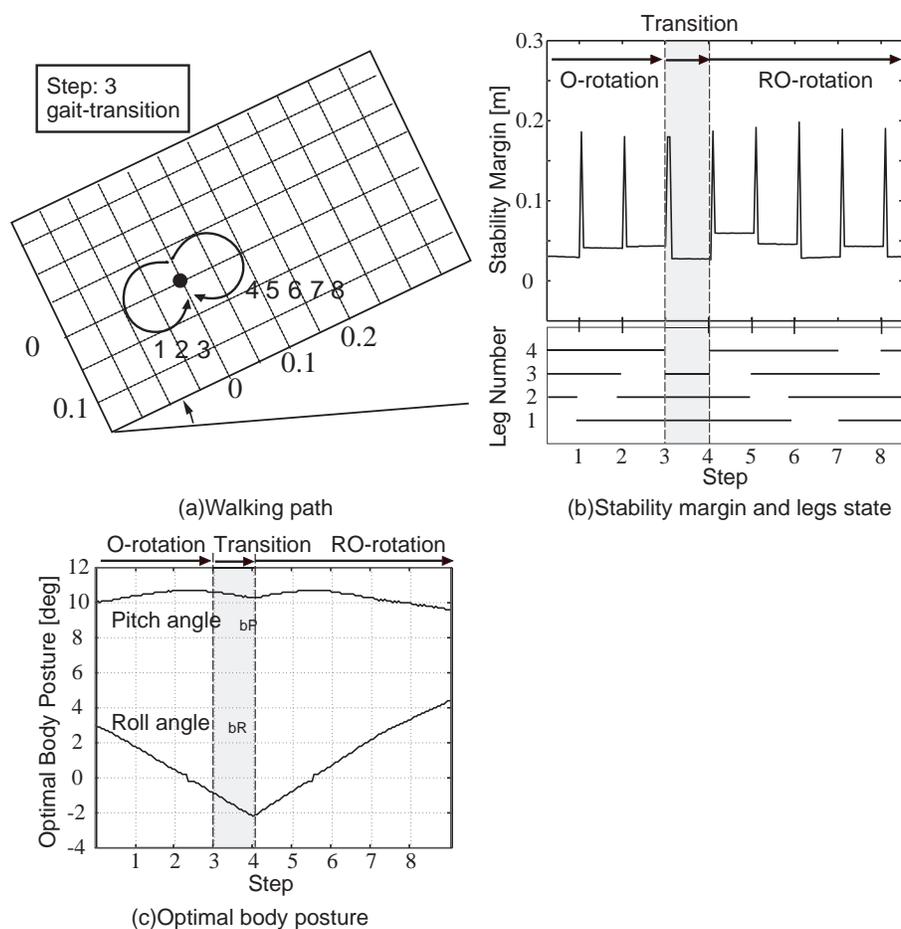


Figure 5.27: Walking path of COG, corresponding stability margin, legs state and optimal body posture for the gait-transition from rotation gait to rotation gait

そして、循環歩容から循環歩容への歩容遷移の場合を考える。そのシミュレーション実験の結果を Fig.5.27 に示す。ロボットの歩行ステップ（1～8）で説明すると、ステップ 1,2 では最適な胴体姿勢を有しながら O 型循環歩容（逆時計回り）でその場の旋回を行っている。3 では脚 4（右前脚）が遊脚となり、歩容遷移を開始する。4 では全ての脚が新しい歩容の脚位置にあるため、歩容遷移が完了する。ステップ 5 からは RO 型循環歩容（時計回り）でその場の旋回となる。Fig.5.27(c) に示すように、ロボットの方向の変化に応じて胴体姿勢が時々刻々に変化し、歩容遷移前後に対称的な変化となっていることが分かる。

## 5.6 重心高さを生かした最適な胴体姿勢による安定性と移動速度の向上について

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。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歩行速度と安定性の向上について検証するため、本研究では、誘導されたCOBP(1)、胴体の重心高さが一定で、姿勢としては水平(2)、傾斜面と平行(3)、筆者らが誘導している最適な姿勢(4) [29] という4つの場合について次の実験を行った。

実験 (1) 任意方向のクロール歩容

実験 (2) 移動方向指定のクロール歩容

実験 (3) 循環歩容

### 5.6.1 移動方向指定のクロール歩容

まず、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5.6はシミュレーションの実験結果、 $S_{NEAvg}$ と移動速度及びそれぞれの向上率を示す。向上率としては胴体水平時の $S_{NEAvg}$ と移動速度と比較した結果である。この結果から見ると、(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分かる。次に、第4.2章で求めた移

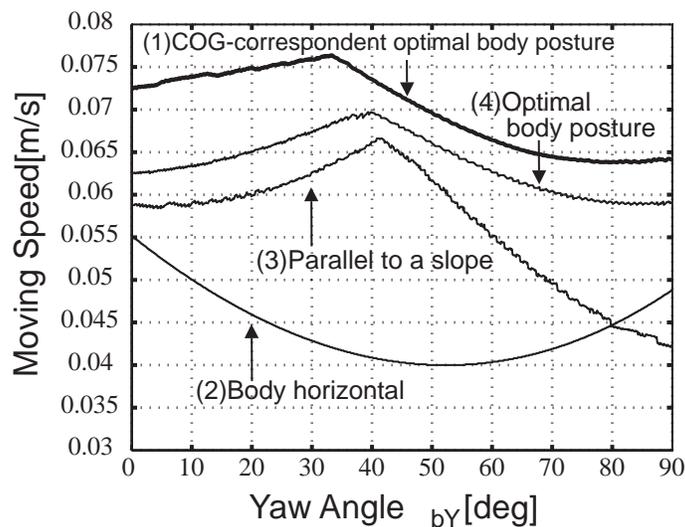
Table 5.6: Improvement in the moving speed by the COBP (specified moving direction,  $\psi_{bY}=60[\text{deg}]$ )

| Body Posture        | Gait Type | bY [deg] | bR [deg] | bP [deg] | Hcog [m] | Moving Speed [m/s] | Increase Rate [%] | Average $S_{NE}$ [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(Hcog 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   |          | 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(Hcog 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 Hcog

COBP: optimal Hcog and optimal body posture in consideration stability

動方向指定のクロール歩容に対して、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。Table 5.28に示すように、導出された重心高さを生か



(a) Moving speed

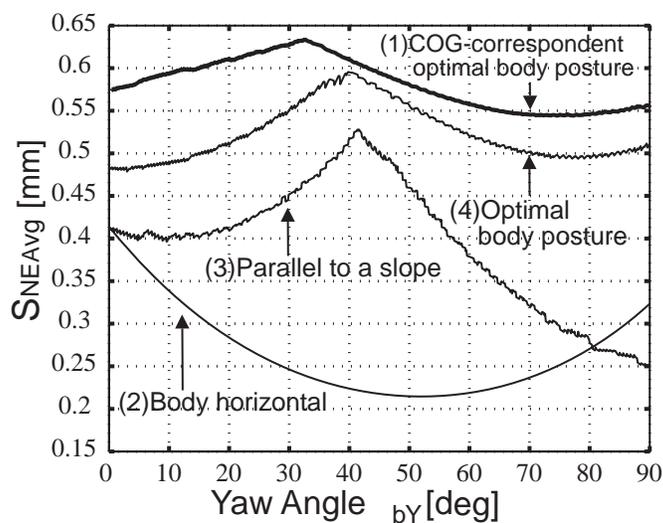
(b)  $S_{NEAvg}$ 

Figure 5.28: Moving speed and  $S_{NEAvg}$  in crawl gait while the specified moving direction is set as a 30[deg] angle of the  $X_\alpha$ -axis (Fig.4.7(c)(d))

した最適な胴体姿勢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。

## 5.6.2 任意方向のクローल歩容

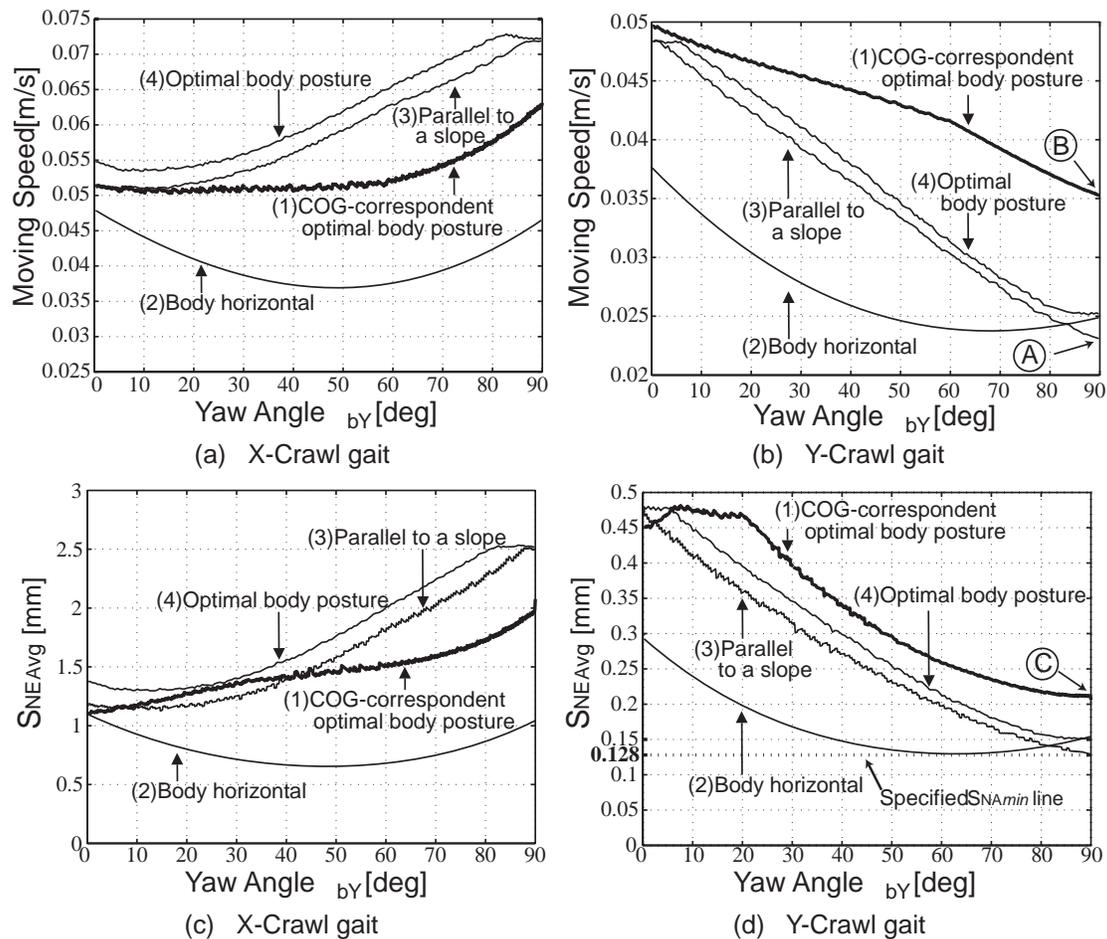


Figure 5.29: Verification of the improvement in moving speed and  $S_{NEAvg}$  (X, Y-Crawl gait for arbitrary moving direction)

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。Fig.5.29 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、このときの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ためである。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ため、任意方向のクロール歩容での全方位静歩行に影響しない。

Table 5.7: Improvement in the moving speed by COBP (arbitrary moving direction)

| Body Posture        | Gait Type | bY [deg] | bR [deg]   | 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(Hcog 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     |           | 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(Hcog 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(Hcog 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     |           | 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(Hcog fixation)  |           |          | 9.5        | 0.0        | 0.243        | 0.0253             | 1.6               | 0.147        | -2.0              |
| <b>COBP</b>         |           |          | <b>6.2</b> | <b>0.0</b> | <b>0.221</b> | <b>0.0354</b>      | <b>42.2</b>       | <b>0.206</b> | <b>37.3</b>       |

Table.5.7 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。この結果から見ると、 $\psi_{bY}=90[\text{deg}]$  で Y クロール歩行を行ったとき、(3) (Fig.5.29(b) に示すⒶ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である。それに対して、(1) における歩行の移動速度は (Fig.5.29(b)Ⓑ点) 最も速く、安定性が (Fig.5.29(d)Ⓒ点) 大幅に向上していることが分かる。

### 5.6.3 循環歩容

ロボットの方向が  $0 \leq \psi_{bY} \leq 90[\text{deg}]$  の範囲内に、その場の旋回歩行シミュレーション実験を行った。Fig.5.30 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) では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をも判明した。また、 $S_{NEAvg}$  が常に最大ではないものの、設定された  $S_{NAmin}$  より十分大きく、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。

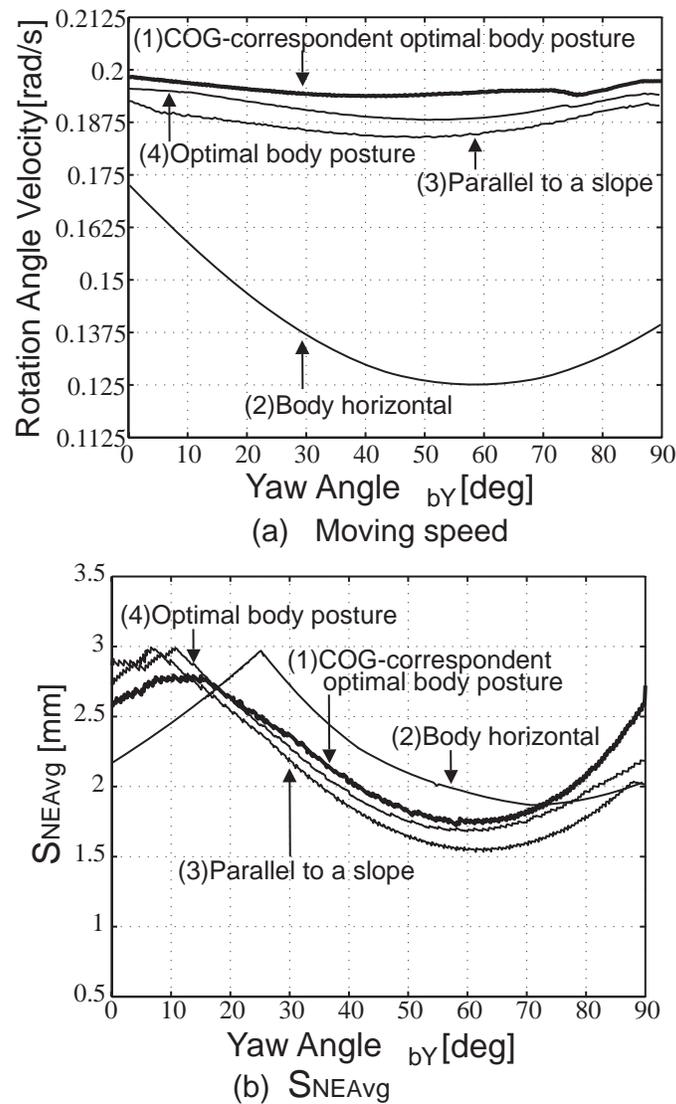


Figure 5.30: Verification of the improvement in moving speed and  $S_{NEAvg}$  (Rotation gait)

## 5.7 重心高さを生かした最適な胴体姿勢を有する歩容遷移について

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 Fig.5.31 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。

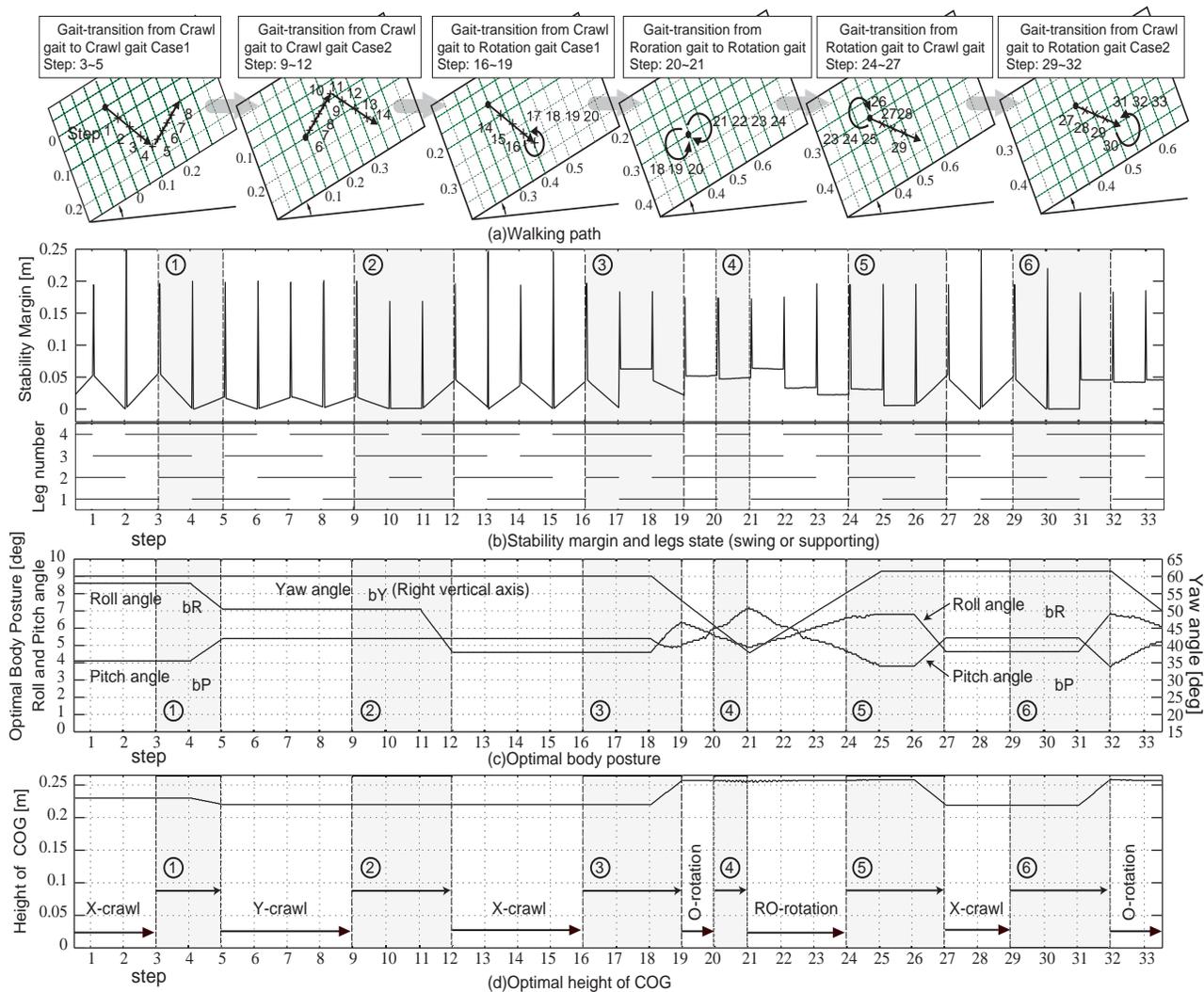


Figure 5.31: Simulation result of all gait-transition patterns. Walking path of COG, corresponding stability margin and legs state, optimal body posture and optimal height of COG

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、まず、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 ( $\psi_{bR}=8.6[\text{deg}], \psi_{bP}=4.1[\text{deg}], H_{cog}=0.230[\text{m}]$ ) 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  $\psi_{bR}=7.1[\text{deg}], \psi_{bP}=5.6[\text{deg}], H_{cog}=0.220[\text{m}]$  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、 $H_{cog}$  を  $0.230[\text{m}]$  から  $0.220[\text{m}]$  へ重心高さの変更を行う。5 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。

次に、④の場合を考える。ロボットの歩行ステップ 19 では COBP を有しながら O 型循環歩容 (逆時計回り) でその場の旋回を行っている。20 では脚 4 (右前脚) が遊脚となり、歩容遷移を開始する。21 では全ての脚が新しい歩容の脚位置にあるため、歩容遷移が完了する。ステップ 22 からは RO 型循環歩容 (時計回り) でその場の旋回となる。Fig.5.31(c)(d) に示すように、ロボットの方向の変化に応じて胴体姿勢と重心高さが時々刻々に変更し、歩容遷移前後に対称的な変化となっていることが分かる。

そして、⑤の場合を考える。ステップ 23 では COBP を有しながら循環歩容でその場の旋回を行っている。ここで、Fig.5.31(c) に示すように、ロボットの方向の変化に応じて、胴体姿勢と重心高さが時々刻々に変化していることが分かる。24 では脚 2 (左後脚) が遊脚となり、歩容遷移を開始する。25 では進行方向に支持脚三角形が形成されるのを待つため、胴体の移動を遊脚時間 1 回分だけ停止する。26 では⑤の Step3 に入る。このとき、Yaw 角が  $\psi_{bY}=61.4[\text{deg}]$  となり、新しい歩容の X クロール歩容における COBP は  $\psi_{bR}=4.7[\text{deg}], \psi_{bP}=5.4[\text{deg}], H_{cog}=0.219[\text{m}]$  であるため、Roll 角を  $1.6[\text{deg}]$  から  $4.7[\text{deg}]$  へ、Pitch 角を  $10.4[\text{deg}]$  から  $5.4[\text{deg}]$  へ姿勢変更を行い、 $H_{cog}$  を  $0.258[\text{m}]$  から  $0.219[\text{m}]$  へ重心高さの変更を行う。27 で歩容遷移が完了し、ステップ 28,29 では X クロール歩容で直進することを示している。

## 5.8 斜面全方位静歩行の実機実験

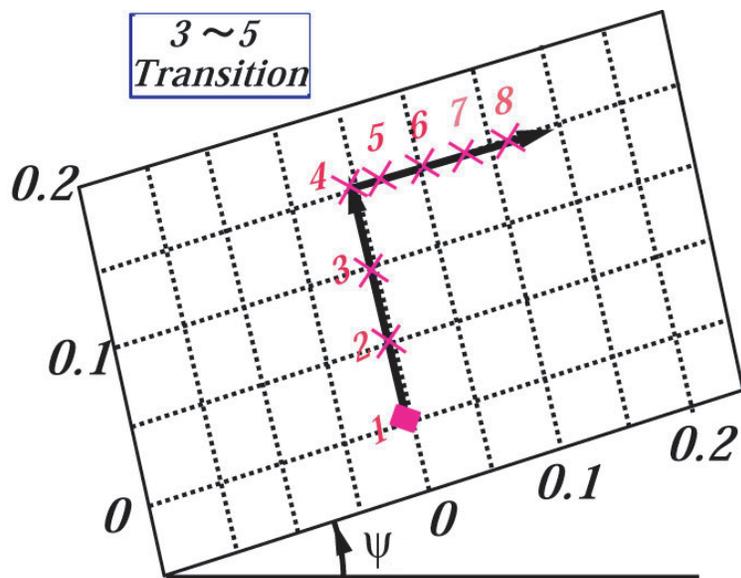
提案した手法を用いて実機での傾斜面歩行を行った。

### 5.8.1 胴体姿勢と重心高さを任意に維持した状態での斜面全方位静歩行の実機実験

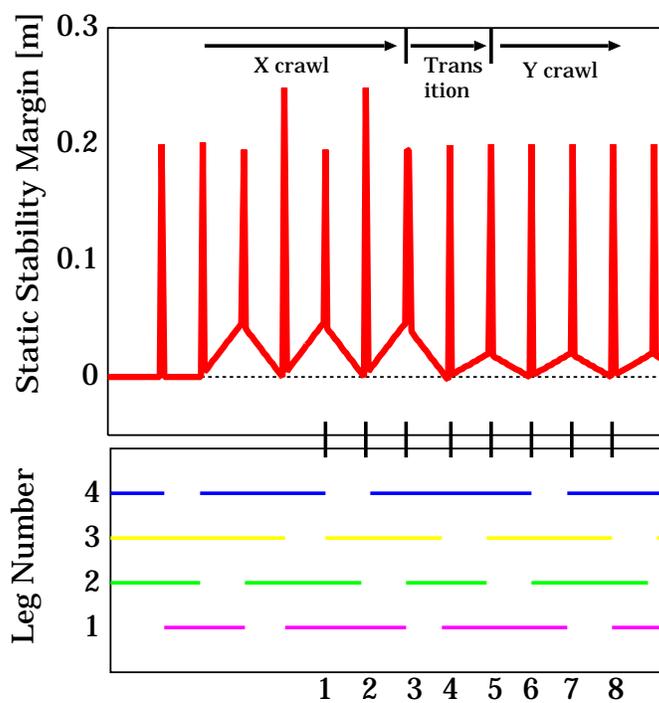
傾斜面はロボットの脚先の機構的な制限によりまず、傾斜面は傾斜角  $\psi=5.0[\text{deg}]$  , 重心高さは  $H_{cog}=0.243[\text{m}]$  , 胴体姿勢は胴体 Roll 角  $\psi_{bR}=5.0[\text{deg}]$  , 胴体 Pitch 角  $\psi_{bP}=0.0[\text{deg}]$  , 胴体 Yaw 角  $\psi_{bY}=90.0[\text{deg}]$  でクローラからクローラの歩容遷移 (Case1) を行った。Fig.5.33 に歩行を行った時の連続写真を示す。

また、傾斜角  $\psi=10.0[\text{deg}]$  , 胴体 Roll 角  $\psi_{bR}=10.0[\text{deg}]$  ,, 重心高さは  $H_{cog}=0.243[\text{m}]$  , 胴体姿勢は胴体 Pitch 角  $\psi_{bP}=0.0[\text{deg}]$  , 胴体 Yaw 角  $\psi_{bY}=90.0[\text{deg}]$  での歩行も行った。ロボットは傾斜面を X クローラ歩容で横切ったあと、Y クローラ歩容で傾斜面を登って行く。歩容遷移はクローラからクローラの歩容遷移となる。クローラからクローラ (Case 2) を行った連続写真は Fig.5.35 に示す。

Fig.5.33 ~ Fig.5.35 に示されているとおり実機実験においてもクローラ歩容および歩容遷移中にロボットが転倒してしまうということはなく、傾斜面を登ることができた。しかし、転倒モーメントが発生し、ロボットの胴体が傾くことがあった。また TITAN-VIII の脚先ではロボットが見た傾斜面方向  $\psi_{Yb}=90.0[\text{deg}]$  ,  $-90.0[\text{deg}]$  の傾斜面の歩行しかできないので、あらゆる方向の傾斜面の歩行を実証するには不十分だった。

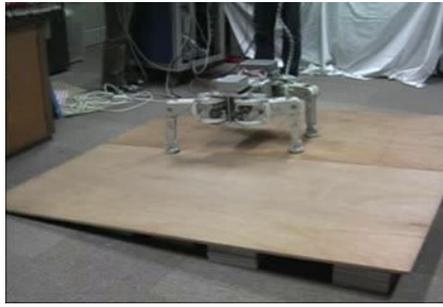


(a) Walking path



(b) Static stability margin and leg's state

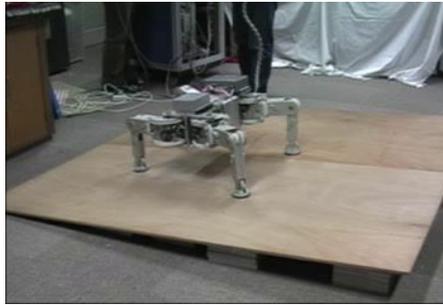
Figure 5.32: Walking path of COG, corresponding stability margin and legs state for the gait-transition from crawl gait to crawl gait (case 1)



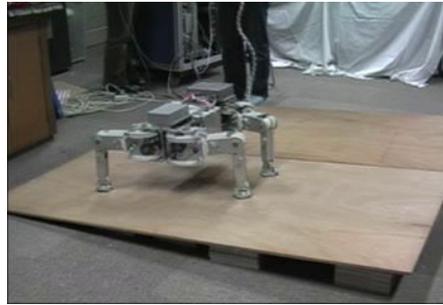
(a) step 1



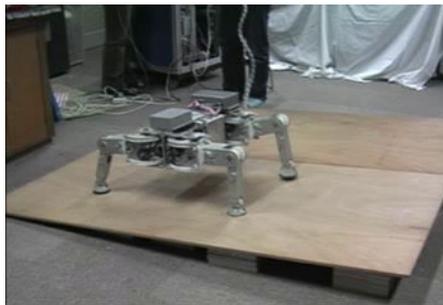
(b) step 2



(c) step 3



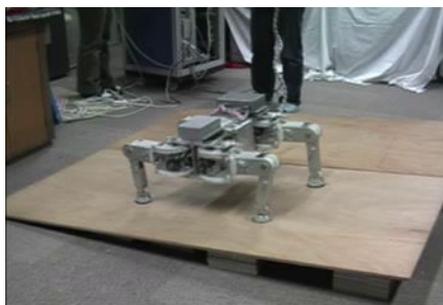
(d) step 4



(e) step 5



(f) step 6

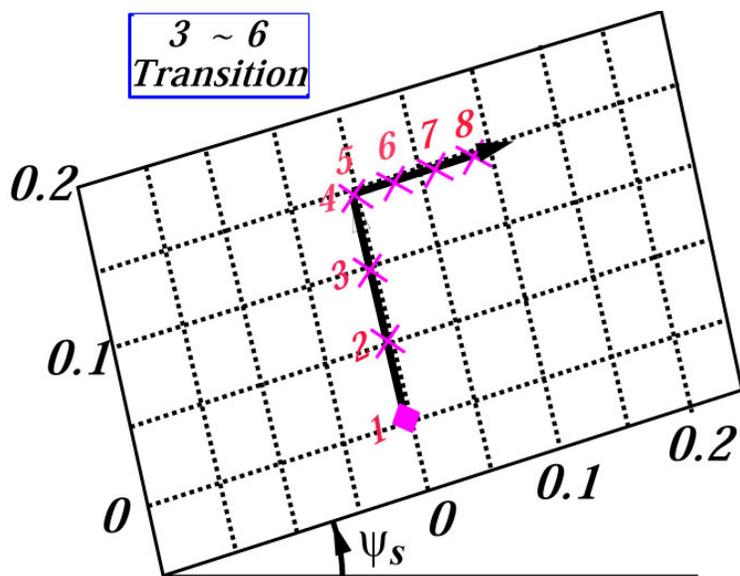


(g) step 7

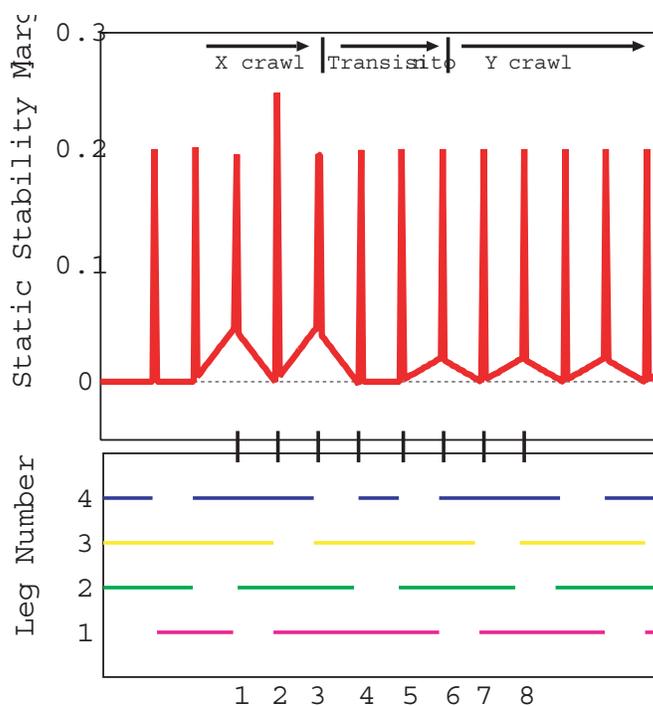


(h) step 8

Figure 5.33: Quadruped robot motion for the gait-transition from crawl gait to crawl gait (case 1) on a slope of inclination angle 5.0



(a) Walking path



(b) Static stability margin and leg's state

Figure 5.34: Walking path of COG, corresponding stability margin and legs state for the gait-transition from crawl gait to crawl gait (Case 2)



(a) step 1



(b) step 2



(c) step 3



(d) step 4



(e) step 5



(f) step 6



(g) step 7



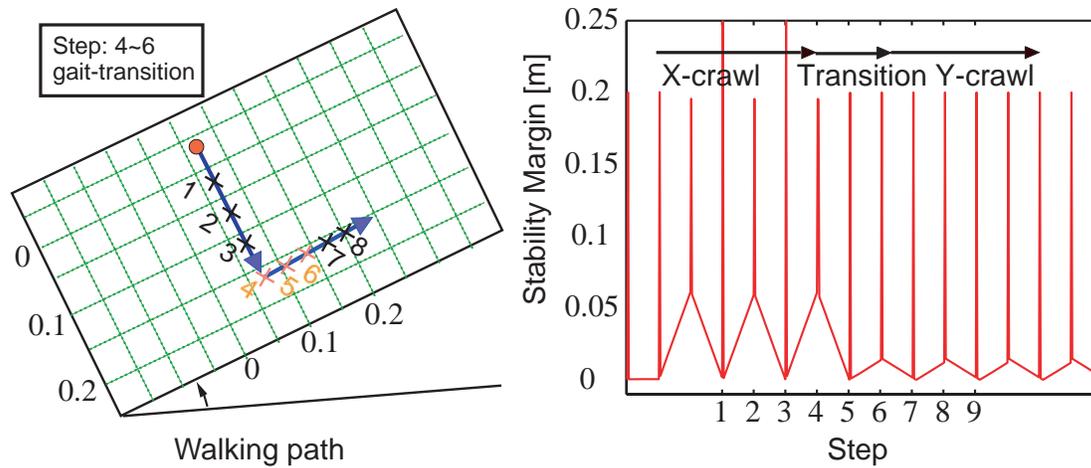
(h) step 8

Figure 5.35: Side view of quadruped robot motion for the gait-transition from crawl gait to crawl gait (case 1) on a slope of inclination angle 10.0

### 5.8.2 重心高さを生かした最適な胴体姿勢を有する全方位歩行の実機実験

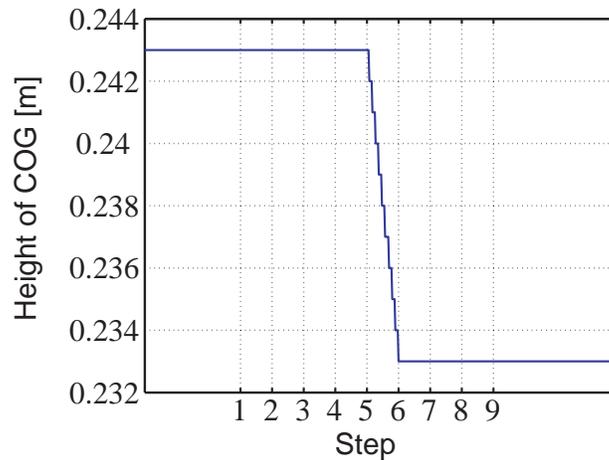
まず，傾斜面は傾斜角  $\psi=10.0[\text{deg}]$ ，胴体姿勢は胴体 Roll 角  $\psi_{bR}=9.5[\text{deg}]$ ，胴体 Pitch 角  $\psi_{bP}=0.0[\text{deg}]$ ，胴体 Yaw 角  $\psi_{bY}=90.0[\text{deg}]$  で X クロールから Y クロールの歩容遷移 (Case1) を行った．歩容遷移中に重心高さを変化させる．重心高さの変化は  $H_{cog} : 0.243[\text{m}] \Rightarrow 0.233[\text{m}]$  とする．Fig.5.37 に歩行を行った時の連続写真を示す．

次に，重心高さを生かした最適な胴体姿勢を有する全方位歩行の実機実験を行う．傾斜面は傾斜角  $\psi=10.0[\text{deg}]$ ，胴体 Pitch 角  $\psi_{bP}=0.0[\text{deg}]$ ，胴体 Yaw 角  $\psi_{bY}=90.0[\text{deg}]$  で X クロールから Y クロールの歩容遷移 (Case1) を行った．この場合，X クロール歩容に対して重心高さを生かした最適な胴体姿勢は  $H_{cog}=0.247[\text{m}]$ ，胴体 Roll 角を  $\psi_{bR}=10.0[\text{deg}]$  であり，Y クロール歩容に対しては  $H_{cog}=0.221[\text{m}]$ ，胴体 Roll 角を  $\psi_{bR}=6.2[\text{deg}]$  である．そのため，歩容遷移中に重心高さと胴体姿勢が変化される．胴体 Roll 角を  $\psi_{bR}=10.0[\text{deg}] \Rightarrow 6.2[\text{deg}]$  のように変更する．重心高さの変化は  $H_{cog} : 0.247[\text{m}] \Rightarrow 0.221[\text{m}]$  となる．Fig.5.39 に歩行を行った時の連続写真を示す．



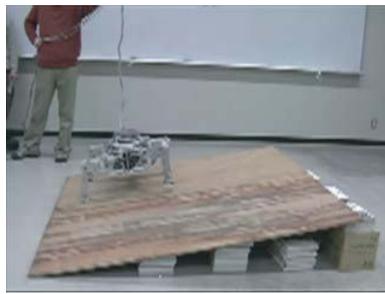
(a) Walking path

(b) Stability margin

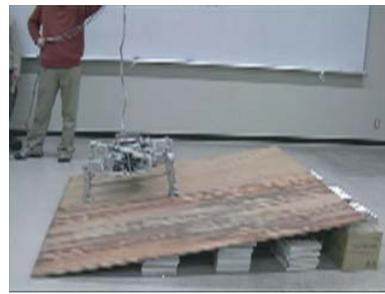


(c) Changing of the height of COG

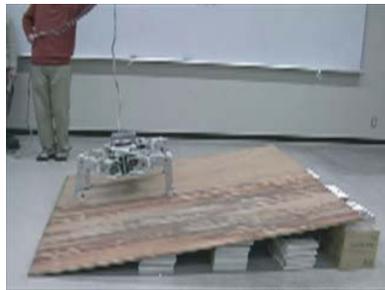
Figure 5.36: Simulation result of the gait-transition from crawl gait to crawl gait (case 1) on a slope of inclination angle 10.0 by changing the height of COG



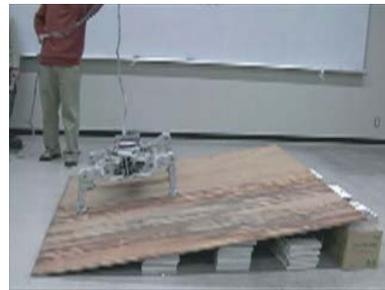
(a) step 1



(b) step 2



(c) step 3



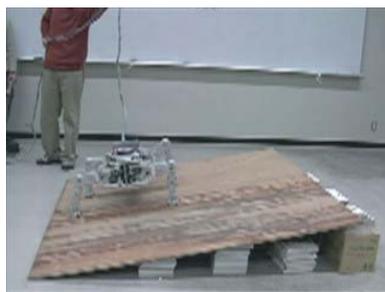
(d) step 4



(e) step 5



(f) step 6

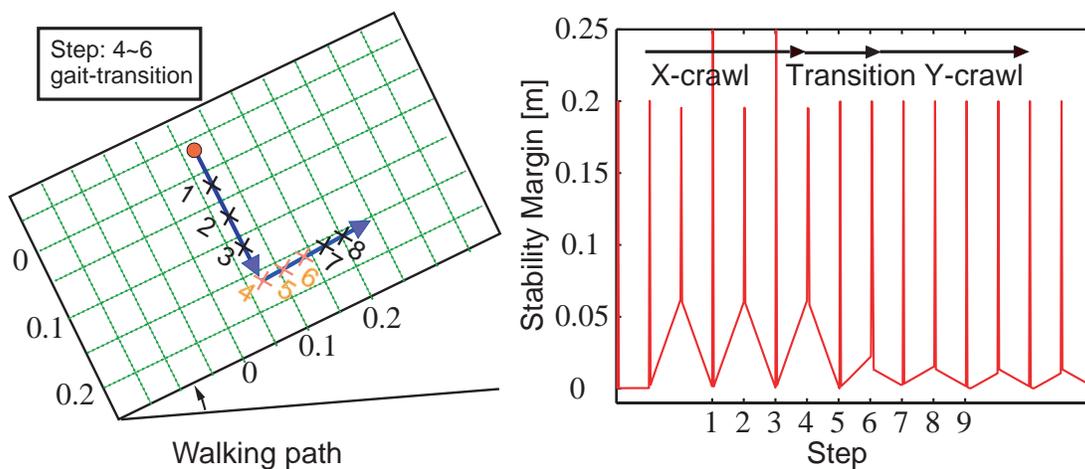


(g) step 7



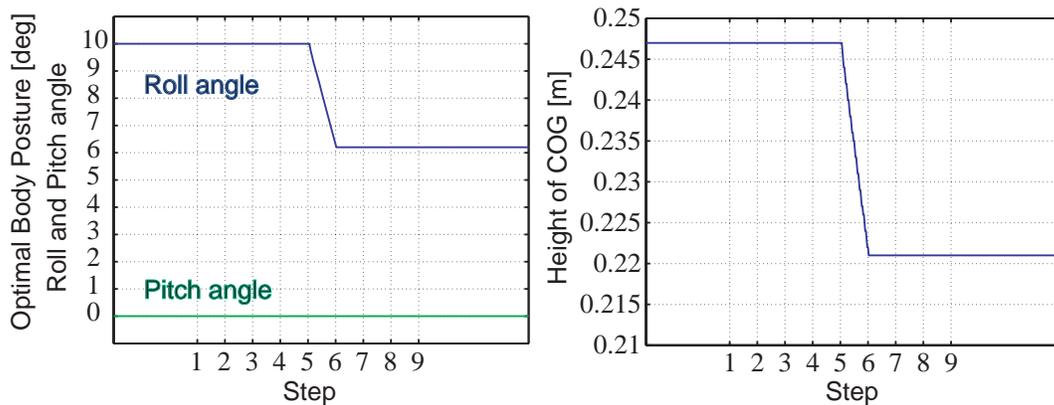
(h) step 8

Figure 5.37: Quadruped robot motion for the gait-transition from crawl gait to crawl gait (case 1) on a slope of inclination angle 10.0 by changing the height of COG



(a) Walking path

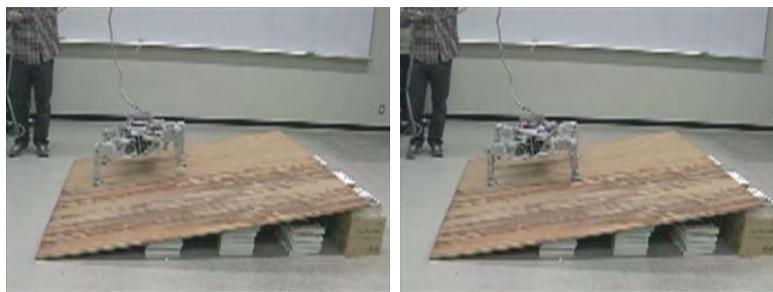
(b) Stability margin



(c) Changing of the body posture

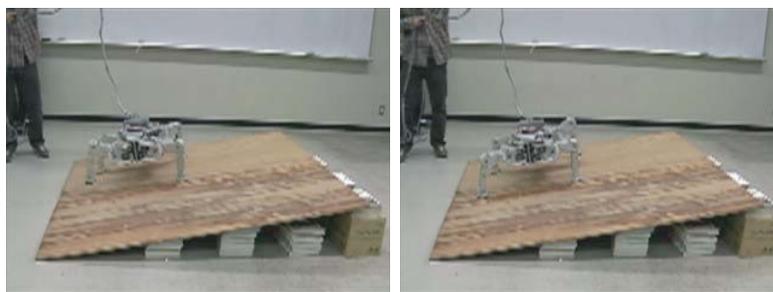
(d) Changing of the height of COG

Figure 5.38: Simulation result of the gait-transition from crawl gait to crawl gait (case 1) with COBP on a slope of inclination angle 10.0



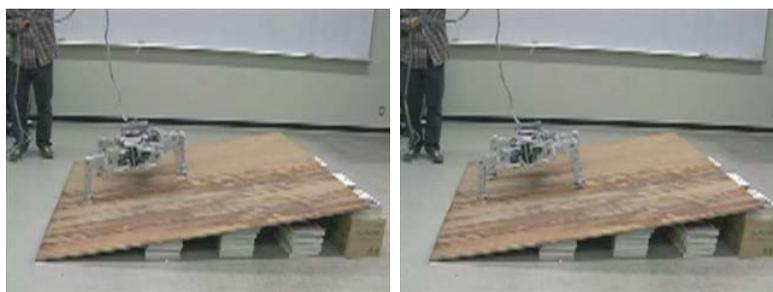
(a) step 1

(b) step 2



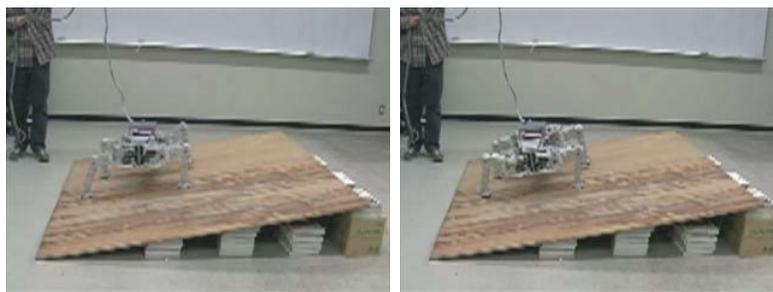
(c) step 3

(d) step 4



(e) step 5

(f) step 6



(g) step 7

(h) step 8

Figure 5.39: Side view of quadruped robot motion for the gait-transition from crawl gait to crawl gait (case 1) with COBP on a slope of inclination angle 10.0

## 5.9 おわりに

本章では、傾斜面における4脚ロボットの安定性と移動速度を向上するために、実機実験および計算機シミュレーションにより、第2章、第3章、および第4章において提案した歩容計画で傾斜面を安定に歩行できることを確認した。

第5.3節では、第2章で提案する手法を用いて、歩容遷移をシミュレーション上で行い、胴体姿勢と重心高さを任意に維持した状態での斜面全方位静歩行の安定性について検証した。また、胴体姿勢が変化することで速度が変化することを確認し、最大速度になる角度について検証した。さらに、重心高さによる移動速度と安定性への影響についてシミュレーションを行い、積極的に重心高さと胴体姿勢を変更することで移動速度と安定性の向上に有効に利用できることを検証した。

第5.4節、第5.5節では、第3章で誘導した最適な胴体姿勢を用いて、胴体の重心高さが一定で、その姿勢としては水平、傾斜面と平行、誘導された最適な姿勢など、3つのパターンについてシミュレーション実験を行った。導出された最適な胴体姿勢における移動速度が大幅に向上していることを明らかにした。また、その最適な胴体姿勢を維持した連続的な歩容遷移手法をシミュレーション上で行い、連続的な歩容遷移手法の有効性を検証した。提案した手法を用いて、4脚ロボットは傾斜面において、安定かつ連続に、移動速度を最大にする最適な胴体姿勢を維持した上で、全方位静歩行を実現していることを明らかにした。

第5.6節では、第4章で誘導した傾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を用いてシミュレーション実験を行った。このシミュレーション実験では、歩容遷移パターン毎に行ったことではなく、全パターンを連続して一気に行ったものである。歩容遷移中に積極的に重心高さと胴体姿勢を変更し、その重心高さを生かした最適な胴体姿勢を維持した連続的な歩容遷移手法の有効性を検証した。提案した手法を用いて、4脚ロボットは傾斜面において、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を明らかにした。

第5.7節では、胴体姿勢と重心高さを任意に維持した状態での斜面全方位静歩行、重心高さを生かした最適な胴体姿勢を有しながら連続的な歩容遷移手法を実機で検証した。実機により実際に傾斜面を歩行させ、転倒せずに歩行できることを確認した。しかし、シミュレーションでは安定であるものの、実機では胴体が傾いてしまうという現象が起こった。これは実機のモデル化の誤差、不正確な傾斜面、RT化してないための制御的な誤差などの原因が考えられる。また、実機の脚先の自由度が少なく、実際に歩行できたのは傾斜面方向が $90.0[deg]$ 、または $-90.0[deg]$ のような、ロボットから見て真横の傾斜面だけだった。これ以外の方向の傾斜面上での歩行は確認できなかった。これだけでは全ての方向の傾斜面上を歩行できたとは実証できないので、脚先の機構を改良し、全ての方向の傾斜面上を歩行できることを確認しなければならない。

# 第6章 結論と今後の課題

## 目次

---

|     |                 |     |
|-----|-----------------|-----|
| 6.1 | 結論 . . . . .    | 154 |
| 6.2 | 今後の課題 . . . . . | 156 |

---

## 6.1 結論

本論文は、積極的に重心高さや胴体姿勢を変更することによって傾斜面における4脚ロボットの安定性の向上、移動速度の最大化及び全方位静歩行を統合的に実現する手法に関する研究をまとめたものである。4脚ロボットの安定性の向上、移動速度の最大化及び斜面全方位静歩行を統合的に実現する手法として、傾斜面の傾斜角とロボットの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を明らかにし、それを有する連続的な歩容遷移手法を提案した。重心高さを活かしながら最適な胴体姿勢の誘導には3脚支持期間の安定性を考慮して、歩容遷移中に重心高さや胴体姿勢の変更、胴体の推進運動をも考慮しているため、確実に速い移動速度で安定した斜面全方位静歩行を実現した。

本論文ではまず、傾斜面歩行環境に応じて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、その最適な胴体姿勢を有しながら傾斜面において連続的に歩容遷移を行う手法を提案した。傾斜面における最適な胴体姿勢としては、クロール歩容に対して任意の移動方向及び指定された方向、循環歩容に対してその場の旋回について導出した移動速度を最大にする胴体姿勢である。これらの歩容を組み合わせることによって最適な胴体姿勢を有する全方位静歩行を実現した。しかし、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。そのため、本論文ではさらに、傾斜面における4脚ロボットの安定性の向上、移動速度の最大化及び全方位静歩行の実現を統合的に議論し、積極的に重心高さや胴体姿勢を変更することによって傾斜面の傾斜角とロボットの移動方向に応じて、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を明らかにした。なお、その重心高さを活かしながら最適な胴体姿勢を有する連続的な歩容遷移手法を提案し、確実に速い移動速度で安定した斜面全方位静歩行を実現した。本論文で提案した手法を用いることで、4脚ロボットの対地適応力を高めることができた。

Fig.1.5とFig.1.6に示すような歩容と比較すると、従来研究の手法 [14] [42] より、本研究のほうが傾斜面における4脚ロボットの移動速度が最も速いであることが分かる。また、提案した全方位静歩行の実現手法では、遷移前後の歩容で共通の脚配置（脚基準位置）が存在するように設計することによって、少ない歩数で歩容遷移を完了することができ、従来研究の踏み替え歩容 [7]、歩行パターン間の遷移手法 [41] などより、移動効率を向上できることが確認されている。

本研究で提案した全方位静歩行を行うことで4脚ロボットが、障害物が多く存在する環境においても移動が可能であり、従来研究では移動方向が変化された場合に、必ず胴体停止または脚の踏み替えが必要となる問題を解決することができ、重い貨物を運搬する際にロボットの不連続運動で生じる慣性力による不安定化の問題も解消できる。また、軌道計画・追従型の制御法によって歩行制御を行うため、安定性が高めつつ、再現性に優れている利点を有している。さらに、これま

で実現されていなかった歩容遷移中に，積極的に重心高さと胴体姿勢を変更する制御手法を提案し，実現した．

従来研究と比較することによって，次の点が優れていることが挙げられる．計算機実験および実機実験より，1) 安定性を考慮した積極的に重心高さと胴体姿勢を変更する手法は，従来の全方位静歩行と比べて著しく移動速度を向上し，安定性をも高く保ち得ること；2) 重心高さを生かした最適な胴体姿勢を用いて，傾斜面の傾斜角とロボットの移動方向に応じて移動速度を最大にする全方位静歩行が実現できること；3) 提案する手法を用いて4脚ロボットは傾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明らかにした．

以上のことから，本研究で提案した新しい制御手法は4脚ロボットの研究に寄与することが期待され，実用化問題の解決に向かって大きく一步前進した．将来的に，その制御手法を4脚ロボットに適応することで，災害地での人命救助や地雷撤去，建設現場での作業などに近未来の作業搬送機械への発展やロボットの上アームを乗せて作業するマニピュレータの移動搬送車への応用を考えた場合，高い実用性を発揮するものと考えられる．

## 6.2 今後の課題

本論文では積極的に重心高さや胴体姿勢を変更することによって傾斜面の傾斜角とロボットの移動方向に応じて、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を有する斜面全方位静歩行を実現した。

本研究はまだ初期段階にあるため、問題点と解決すべき課題が数多く残っている。しかし、次に挙げられることを徐々に解決していけば実用化することができる。

まず、実機と理論上のモデルとの間に誤差があるため、理論的には安定であっても、実機だと胴体が傾いてしまうことである。これは実験環境もあまり精密ではないということもあるが、実環境は複雑であるため、ある程度のイレギュラーは吸収できなければならない。そのため脚先にセンサを設置し、床反力から正確な重心の位置を求める。または胴体に傾斜センサを搭載し、適切な胴体姿勢を維持するなど、何らかのセンサを搭載し、それをを用いた歩行についても研究すべきである。

次に、静歩容パターンに基づく歩容計画ではデューティ比  $\beta = 0.75$  として安定余裕を0まで認めていたため、歩容遷移中に安定性が低下することである。安定性を向上するため、間歇クローリング歩容のような安定性の高い歩行パターンを使用する、または、理論的な面でも4脚支持期間を用いてデューティ比を0.75以上に設定し、危険な期間をやり過ごすなどの方法について検討する必要がある。

次に、本研究で用いたロボット TITAN-VIII は脚先に機構的な制限があり、4脚ロボットの傾斜面適応への障害となっている。脚先の機構を改良し、実機があらゆる傾斜面上において全方位歩行を行えるようにしなければならない。

そして、参考文献 [17, 46, 47] などが異なる接地面間の移動を実現していることが報告されている。しかし、それらの研究ではロボットの向きが必ず傾斜面方向と一致するように指定されている。任意向きでの最適な胴体姿勢を有しながら平面から傾斜面、傾斜面の間、多様な傾斜面の乗り移りを行う手法、複雑な足場での全方位静歩行の実現などが今後研究を続ける必要がある。

また、本論文では傾斜面上の脚基準位置を導出する方法を提案したものの、この手法は最適である保証がされていないため、改良する余地がある。また、傾斜面上の脚可動範囲が決定されると、臨界側行角 ( $\alpha_c$ ) も決定される。しかし、3脚支持期間の安定余裕を一定値以上に維持した場合、歩行できなくなる移動方向が存在するため、実際のクローリング歩容の移動方向の選択範囲について検討する必要がある。そして、時々刻々に重心高さ、胴体姿勢が変更できるためにその変更時刻の最適化、ロボットの可動領域を最大限に活用した4脚歩行ロボットの歩容計画など挙げられる。

さらに、本論文では理想的な傾斜面の歩行を扱ったが、途中で傾斜角が変化している、傾斜面が緩やかに旋回している、凹凸がある傾斜面など複雑さを増した傾斜面や、段差のようなさらに複雑な地形など、様々な不整地が存在する。これらを歩行するためセンサや自由歩容の適用も視野にいれ、実際に社会空間や自然環境下での活動が可能な4脚ロボットの開発を目指す。

# 謝辞

本論文は、著者が茨城大学大学院 理工学研究科 生産科学専攻馬・井上研究室において博士課程の期間に行った研究をまとめたものです。その間、常に熱心にご指導頂きました指導教官の立命館大学 COE 推進機構馬 書根教授(元茨城大学大学院理工学研究科システム工学専攻助教授)に心から感謝いたします。研究内容から研究の方法論、研究生活に至るまで、貴重な助言を頂きました。先生に頂いた幅広い視点からのコメントやアドバイスによって、本研究を幅広い視点から評価し直すことができました。

茨城大学大学院理工学研究科生産科学専攻教授浜松 芳夫先生には、研究生活全般において大変お世話になりました。研究者としてのあり方などを含めて、たくさんの事を教えていただきました。深く感謝いたします。

また、本論文をまとめるにあたり、副査をお引き受けくださいました

茨城大学大学院 理工学研究科 機械工学専攻 岡田 養二先生

茨城大学大学院 理工学研究科 システム工学専攻 星野 修先生

茨城大学大学院 理工学研究科 システム工学専攻 山内 智先生

には、謹んで感謝の意を表します。

また、研究において細やかな指導をして頂いた青島 伸一先生、同研究室の井上 康介助手、そして、御意見、御協力下さいました同学科の城 道介教授、白石 昌武教授、新納 浩幸助教授、坪井 一洋助教授、近藤 久講師に感謝の意を表します。

在学中に多岐に渡り指導して頂いた馬研究室卒業生の皆様に感謝致します。大豆生田 吉広氏((株)Canon)、川瀬 雅子氏((株)アルパイン)、田所 直樹氏((株)日立工機)、金 承華氏((株)ファナック)、付 清軍氏((株)スリーエス)に深く感謝します。特に、同研究室4脚ロボットチームとしてゼミ等において熱心な討論を頂いた本田 良徳氏((株)コンピュータロン)、柳田 聡司氏((株)富士写真フイルム)、染谷 研二氏に感謝の意を表します。

ゼミ等において熱心な討論を頂いた同研究室院生、藍 光平氏、Anshuka Srivastava 氏、森園 和也氏、田辺 裕基氏、浅野 裕之氏、佐藤 智紀氏に感謝の意を表します。

また、2004年度の米山奨学生として選ばれ、一年間の奨学金をいただきました。2820地区高萩ロータリークラブの皆様にご世話になりました。皆様との交流を深めながらとても楽しく過ごすことができました。たくさんのいい思い出がありました。クラブの皆様にご深く感謝いたします。



## 参考文献

- [1] E.Muybridge : *Animals in Motion*, Dover Pub,1957.
- [2] P.P.Gambaryan : *How Mammals Run*, Jhon Wiley & Sons,1974.
- [3] R.McN.Alexander : *The Gait of Bipedal and Quadrupedal Animals*, Int.J.Robotics Research,vol.3,no.2,pp.49-59,1984.
- [4] 広瀬, 岩崎, 梅谷 : "歩行機械の静的安定性評価基準", 第21回自動制御連合後援会予稿集,pp.253-254,1978
- [5] 広瀬, 菊地, 梅谷 : "4脚歩行機械の基準旋回歩容", 日本ロボット学会誌,vol2,no6,pp.545-555,1984
- [6] 広瀬, 福田, 菊地 : "4足歩行機械の制御システム", 日本ロボット学会誌,vol.3,no.4,pp.304-323,1985
- [7] 広瀬, 横井 : "4足歩行機械の踏み換えに関する研究", 日本ロボット学会誌,vol.4,no4,pp.364-372,1986
- [8] 広瀬, 国枝 : "4足歩行機械の一般化基準脚軌道", 計測自動制御学会論文集, vol.25, no.4, pp.455-461, 1989.
- [9] 広瀬, 米田 : "実用的4足歩行機械の開発に向けて", 日本ロボット学会誌,vol11,no3,pp.58-63,1992
- [10] 米田, 飯山, 広瀬 : "4足歩行機械の間欠トロット歩容-全方向歩行の動的制御-", 日本ロボット学会誌,vol.14,no.6,pp.881-886,1996
- [11] 広瀬, 米田 : "実用的4足歩行機械の開発に向けて", 日本ロボット学会誌,vol.11,no.3,pp.360-365,1993
- [12] 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
- [13] 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,vol.16,no.8,pp.1076-1082,1998

- [14] 塚越, 広瀬 :”間歇クローリング歩容の提案とその生成原理”, 日本ロボット学会誌, vol.17, no.2, pp.301-309, 1999
- [15] 広瀬, 有川 :”研究用プラットフォームとしての普及型歩行ロボット TITAN-VIII の開発”, 日本ロボット学会誌, vol.17, no.8, pp.1191-1197, 1999.
- [16] K. Arikawa and S. Hirose, *Development of quadruped walking robot TITAN-VIII*, Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems(IROS1996), pp.208-214, 1996.
- [17] 塚越, 土居, 広瀬 :”4足歩行機械による多様な傾斜面の乗り移り歩容”, 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, 1P2-31-025.1999
- [18] 広瀬 :”屋外で活躍する移動ロボットの機構設計”, 日本ロボット学会誌, vol18, no7, pp.2-6, 2000
- [19] S. Hirose, K. Yoneda and H. Tsukagoshi, *TITAN VII: Quadruped Walking and Manipulating Robot on a Steep Slope*, Proc. Int. Conf. on Robotics and Automation, Albuquerque, New Mexico, pp.494-500(1997)
- [20] 尾形, 広瀬 :”歩行ロボットの足首機構の研究”, 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), 1A1-L1-59, 2004 .
- [21] S. Hirose, Y. Fukuda and H. Kikuchi: *The gait control system of a quadruped walking vehicle*, Advanced Robotics 1-4, pp. 289-323, 1986.
- [22] S. Hirose, H. Kikuchi and Y. Umetani: *Standard circular gait of a quadruped walking vehicle*, Advanced Robotics 1-2, pp. 143-164, 1986.
- [23] 富山, 馬, 和田 :”クローリング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, Vol.20, no.3, pp.85-92, 2002.
- [24] S. Ma, T. Tomiyama, and H. Wada, *Omnidirectional Static Walking of a Quadruped Robot*, IEEE Transactions on Robotics, Vol.21, No.2, pp. 152-161, 2005.
- [25] 本田, 馬, 井上 :”斜面における4足歩行ロボットの全方位歩行”, 日本ロボット学会創立20周年記念学術講演会予稿集 (CD-ROM), 1H35, 2002 .
- [26] 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.
- [27] 張, 馬, 井上, 本田 :”最適な胴体姿勢による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), 1P1-L1-64, 2004 .

- [28] L. Zhang, S. Ma, Y. Honda and K. Inoue: *Omni-directional walking of a Quadruped Robot on a Slope*, Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Biomimetics (RoBio2004), pp.234-239, 2004.
- [29] 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), pp.2987-2992, 2005.
- [30] <http://homepage1.nifty.com/BROKEN/project/walk/memo.htm>
- [31] D.A.Messuri and C.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
- [32] 安達，小谷内，新井，本間，篠原，西村：“可動限界到達時の脚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，vol.16, no.3, pp.329-336，1998.
- [33] 桜澤，加賀，稲葉，井上：“四脚ロボットにおける逆台形歩容を用いた階段の昇降”，第17回日本ロボット学会学術講演会予稿集，1E22，1999．
- [34] 田中，永田：“四足ロボットによる階段歩行”，第21回日本ロボット学会学術講演会予稿集（CD-ROM），2G21，2003．
- [35] 佐野，古荘，岡島：“支持脚切り換え現象を考慮した4足歩行ロボットの動的制御”，日本機械学会論文集，C-508，1988．
- [36] 古荘：“歩行ロボットの研究展開”，日本ロボット学会誌，Vol.11,no.3,pp.306-313,1993．
- [37] 伊藤：“歩行運動とリズム生成”，日本ロボット学会誌，Vol.11,no.3,pp.320-325,1993．
- [38] 藤江：“極限作業における4足ロボット”，日本ロボット学会誌，Vol.11,no.3,pp.366-371,1993．
- [39] 田川，相山，石渡：“脚式移動マニピュレータにおける冗長自由度を利用したふんばり動作”，第20回日本ロボット学会学術講演会予稿集（CD-ROM），2002
- [40] 木村，中野，野中：“脚車輪型ロボットの開発および脚と車輪の協調動作”，日本ロボット学会誌，Vol.10,no.4,pp.94-99,1992．
- [41] V.Hugel and P.Blazevic : *Towards efficient implantation of quadruped gaits with duty factor of 0.75*, in Proc.IEEE Int.Conf.on Robotics and Automation,pp.2360-2365,1999

- [42] 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), pp.589-594, 2003.
- [43] 五十嵐, 柿倉: "3次元複雑環境における脚型ロボットの経路計画", 第9回建設ロボットシンポジウム論文集, pp.281-288, 2002.
- [44] H. Igarashi and M. Kakikura, *Adaptive Gait for a Quadruped Robot on 3D Path Planning*, Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation (ICRA2003), pp.2049-2054, 2003.
- [45] H. Igarashi and M. Kakikura, *Local Obstacle Recognition for a Quadruped Robot by Distance Sensors*, IEEE Int. Conf. on Robotics, Intelligent Systems and Signal Processing (RISSP2003), pp.501-506, 2003.
- [46] T. Kang, H. Kim, T. Son and H. Choit, *Desing of Quadruped Walking and Climbing Robot*, Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS2003), pp.619-624, 2003.
- [47] H. Kim, T. Kang, et al. *Gait Planning of Quadruped Walking and Climbing Robot for Locomotion in 3D Environment*, Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation (ICRA2005), pp.2744-2749, 2005.
- [48] 木村, 下山, 三浦: "四足ロボットの力学的解析", 日本ロボット学会誌, Vol.6, no.5, pp.367-378, 1988.
- [49] 福岡, 木村: "4足ロボットの生物規範型不整地適応動歩行—神経-機械カップリング系構成法の提案とピッチ運・CPG・ロール運動間相互引き込みの評価—", 日本ロボット学会誌, vol.21, no.5, pp.109-120, 2003.
- [50] Y. Fukuoka, H. Kimura, Y. Hada and K. Takase: *Adaptive Dynamic Waking of a Quadruped Robot 'Tekken' on Irregular Terrain Using a Neural System Model*, Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 2037-2042, 2003.
- [51] C. Ridderstrom, and J. Ingvast, *Quadruped posture control based on simple force distribution -a notion and trial*, Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS'01), pp. 2326-22331, 2001.
- [52] K. Kamikawa, T. Arai, K. Inoue and Y. Mae: *Omni-directional Gait of Multi-Legged Rescue Robot*, Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 2171-2176, 2004.
- [53] 日本ロボット学会編: "ロボット工学ハンドブック", コロナ社, 1984

- [54] 茨木，福島：最適化プログラミング．nos.4,7，岩波書店，1991．
- [55] 茨木，福島：最適化の手法．nos.4，共立出版，1993．
- [56] 広瀬：ロボット工学，裳華房，1996.
- [57] 川崎：ロボット工学の基礎（株）森北出版，1991.



# 発表論文

- [1] L. Zhang, S. Ma, Y. Honda and K. Inoue "Omnidirectional Static Walking of a Quadruped Robot on a Slope". Journal of Robotics and Mechatronics, Vol.18 No.1, 2006 (2006.1 掲載予定)
- [2] 張磊, 馬書根, “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”. 日本機械学会論文集 (C編), 日本機械学会論文集, (2006.2 掲載予定) .
- [3] L. Zhang, S. Ma, K. Inoue and Y. Honda, "Omni-directional Walking of a Quadruped Robot with Optimal Body Postures on a Slope". in Proc.2005 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation (ICRA'05), pp.2987–2992, (2005,4).
- [4] L. Zhang, S. Ma, Y. Honda and K. Inoue, "Omni-directional Walking of a Quadruped Robot on a Slope". in Proc.2004 IEEE Int. Conf. on Robotics and Biomimetics (Robio'04), pp.234–239. (2004.8).
- [5] L. Zhang, S. Ma, "Several Insights into Omnidirectional Walking of a Quadruped Robot on a Slope". in Proc.2006 IEEE/RSJ Int. Conf. on Robotics and Automation (IROS'06), (2006.2 査読中).
- [6] 張磊, 馬書根, 井上康介, 本田良徳, “最適な胴体姿勢による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'04 講演論文集 (CD-ROM),1P1-L1-64 (2004.6).
- [7] 本田良徳, 馬書根, 井上康介, 張磊, “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'04 講演論文集 (CD-ROM),1A1-L1-57 (2004.6).
- [8] 張磊, 馬書根, “重心高さを生かした最適な胴体姿勢を有する4脚ロボットの全方位静歩行”. 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'05 講演論文集 (CD-ROM),2P1-S-040 (2005.6).
- [9] 柳田聡司, 馬書根, 張磊, 井上康介, “クローリング歩容による4足ロボットの安定余裕を保つ斜面全方位歩行”. 第23回日本ロボット学会学術講演会'05 講演論文集 (CD-ROM),3G13 (2005.9).