重力モーメント考慮の姿勢制御による マルチロコモーションロボットを用いての垂直梯子登り運動*

米田 裕成^{*1}, 関山 浩介^{*2}
長谷川 泰久^{*3}, 福田 敏男^{*4}

Vertical Ladder Climbing Motion with Posture Control Considering Gravitation Momentum for Multi-Locomotion Robot

Hironari YONEDA^{*5}, Kosuke SEKIYAMA,
Yasuhisa HASEGAWA and Toshio FUKUDA

^{*5} Department of Micro-Nano Systems Engineering, Nagoya University,
1 Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya-shi, Aichi, 464-8603 Japan

This paper introduces a vertical ladder climbing of humanoid robot only by a posture control without any external sensors. The humanoid robot does not have any special structure for fixing the body to the ladder. The robot maintains the body on the ladder by its grippers like human does. As a problem of this locomotion, a free gripper position of the climbing robot is not controllable because a yawing of the robot body around the axis connecting a supporting gripper and foot on the ladder is not fixed. To solve this problem, the momentum around the axis caused by the gravity is used to control the yaw motion of the body so that the various gait such as pace gait and trot gait could be realized in a ladder climbing maneuver. The algorithm of ladder climbing with recovery motion is experimentally verified by using "Multi-Locomotion Robot (MLR)" which is developed to achieve various types of locomotion such as biped, quadruped walking and brachiation.

Key Words: Humanoid, Moving Robot, Motion Control, Vertical Ladder Climbing, Multi-Locomotion Robot

1. は じ め に

地球上で暮らす高度な生物は、環境の変化に応じて様々な機能を使い分けることで、その活動範囲を広げていると考えられる。同様に、将来人間の住空間での活躍が期待されるロボットにおいても、一台のロボットが多機能性を有し、それらを自ら環境に応じて選択することで、優れた環境適応能力を発揮することが期待できる。このような観点から、我々はロボットに求められる代表的かつ重要な機能である移動機能に着目し、新たな生物規範型ロボットとして二足歩行、四足歩行に加えてブラキエーション運動(枝渡り動作)など、様々な移動形態を有するマルチロコモーションロボット(MLR)という概念を提案し、単体のロボットを用いてのそれぞれの運動実現に向けて研究・開発を行ってきた^{(1)~(3)}。多くの移動形態を有するMLRにより、ある移動形態から環境に応じて自律的に別の移動形態に遷移し、どのような環境にあっても安定な動作

Fig. 1 Concept of MLR

を続けることが可能であると考えられ、人間環境にて活動するロボットを発展において単体のロボットによる移動機能の発展は不可欠であると考えた(図1)。

F. Kanehiro 等は MLR の一つである HRP-II を用いての、異なる環境における移動形態の選択についての決定法を示している⁽⁴⁾⁽⁵⁾。我々の開発している MLR の移動形態は個別に扱われており、複数移動形態の自律的遷移までには至っていない。二足歩行状態からブラキエーション動作への自律的遷移には、行動する環境に合わせた上昇動作が必要である。サルやゴリラは木を抱えるようにして上昇し、手足を巧みに用いて胴体を固定している⁽⁶⁾。我々は MLR の上昇動作の方法として、手の握りと足の踏段のみで胴体を固定し、上昇することのできる垂直梯子登りに着目した。垂直梯子

* 原稿受付 2008 年 9 月 4 日。

^{*1} 学生員, 名古屋大学大学院工学研究科マイクロ・ナノシステム工学専攻(〒464-8603 名古屋市千種区不老町 1)。

^{*2} 正員, 名古屋大学大学院工学研究科マイクロ・ナノシステム工学専攻。

^{*3} 正員, 筑波大学大学院システム情報工学研究科知能機能システム専攻(〒305-8573 つくば市天王台 1-1-1)。

^{*4} 正員, フェロー, 名古屋大学大学院工学研究科マイクロ・ナノシステム工学専攻。

E-mail: yoneda@robo.mein.nagoya-u.ac.jp

を用いるメリットには、以下の点があげられる。

- 胴体を完全固定する特別な機構がなくても、手足の把持により梯子へ留めることが可能である。
- 上昇動作時に、手足を梯子に固定したり外したりするのに時間がかからない。

ここで、垂直上昇動作における安定を保つための従来研究について述べる。垂直梯子登りに関連した研究には垂直壁登りや梯子登りなどが行われている。ロボットが元の姿勢や軌道に戻ることが不可能な姿勢や、全身を支えきれなくなり固定点から離れるなどの状況を避けるため、垂直運動をするロボットの多くは動作中に安定な姿勢が保たれるような構造や運動方法を取り入れている。壁から離れず登る小さなロボットでは、S. Kim 等は、平らでなめらかな表面をやモリのように柔毛のある手足による分子間力を用いて固定しながら上昇する Stickbot と呼ばれるロボットを開発した⁽⁷⁾。G.C. Haynes 等は RiSE という、表面が粗い壁面を小さな爪により引っ掛けて固定しながら上昇する 6 脚ロボットを開発した⁽⁸⁾。これらの構造は小さなロボットが壁面を安定上昇するのに有用であるが、重くて大きいロボットを支えるだけの大きな構造にするのは不可能である。H. Iida 等は、光スイッチの備わるマジックハンドのような手を用いて梯子ステップを認識し掴む動作を行なって垂直梯子を上昇する 4 脚ロボット LCR-1 を開発した。このロボットは 4 点支持中に胴体を上昇し、安定に運動を行うことができるが上昇速度は遅い⁽⁹⁾。あるロボットは特別な構造に加えて、運動制御システムを取り入れている。B. Luk は脚と胴体に取り付けられた吸着盤で胴体を固定する Robug II というメンテナンスロボットを開発した⁽¹⁰⁾。各脚は圧力センサーを用いた触覚認識による足場探索が可能で、さらに各脚にかかる力を分散させるよう脚の位置を調整する制御を行なっている。似たような制御を取り入れ梯子登りを行うロボットとして、S. Fujii 等は ASTERISK と呼ばれる高機動の脚移動型ロボットを開発した⁽¹¹⁾。このロボットは 6 脚であり、4 脚以上を梯子に固定した状態で上昇、さらに各脚の位置エラー値から負荷を分散する制御を行う安定上昇を行った。このような力を分散する制御は多脚支持での上昇運動に適している。歩容パターンの制御として、A. Nagakubo 等は脚に吸着盤が備わる NINJA-I,II という大きな四脚ロボットを用いての壁登りを行った⁽¹²⁾。MLR にも適応可能である、上昇歩容における着地時の姿勢による安定性に着目し、“A 型脚姿勢”を提案し、上昇中に発生するモーメントを巧みに利用した静的、動的な垂直壁登りを実現している。

本論文では、全身を固定するための特別な機能や外界センサーを持たない MLR が四足歩行のような歩容で梯子を登ることが可能であることを示す。我々は、最大で梯子と 4 つの接点を持つ MLR の垂直梯子上昇運動が、地上での四足歩行の動きと類似していることから、その四足歩行の歩容の中から梯子登りで実現可能と思われる 3 点支持でのトランスバース歩容、2 点支持のベース歩容・トロット歩容での梯子登りに着目した。この移動方法での問題は、手足により全身を梯子に留めることが可能でも、完全固定ではないために、重力によるモーメントの影響で MLR が手足の支点を結んだ軸周りに回転し、胴体が梯子から離れてしまう点である。ここで、手の把持点と足の踏段点を結んだ軸を“Axis of Yawing(AOY)”と呼ぶ。AOY 周りに生じる重力と反力の釣り合いを考慮した姿勢を保つよう制御することで静的な上昇動作が安定に実現できる。加えて、不安定な期間が存在する、動的に近い 2 点支持での梯子登りを実現するために、ロボットの加速運動による AOY 周りのモーメントの釣り合いに着目する。理論上、釣り合いのとれる運動から上昇時の目標重心軌道を決定し、その軌道を追従することで上昇動作が実現できる。梯子登りの一連の運動には、把持の失敗を補正するための回復動作を用い、確実に連続動作を実現するように運動を設計する。それぞれの動作実現は実験的に示され、その安定性は、実機実験によるロボットの振る舞いと、主に体を支えている関節である腰と肩のトルク負荷の変化から見積もる。

2. Multi-Locomotion Robot

我々は図 2(a) に示す、実際のゴリラの骨格をモデルとした MLR(Gorilla III)を開発している。腕の長さが脚や胴体より長いという特徴があり、2 足歩行よりブラキエーション運動主体の設計となっているためにトルクは腰モータより肩モータのほうが大きく出せる。Gorilla III の仕様は以下のとおりである:全長 1.0[m]、重量 22[kg]、全体で 24 自由度(片手 5 自由度・片脚 4 自由度・胴体 2 自由度)。各リンク長は図 2(b)で示す。手はサル手状であり、枝に引っ掛ける形に握ることが可能である。足は平板であり、滑りを防ぐためにゴム板を取り付けている(図 2(c))。ロボットの制御システムは図 2(d)に示される通りであり、これらはリアルタイム OS(VX-Works)により実行される。実機の腕には力センサとジャイロが備えられているが、外界センサを用いない運動設計を行うために用いていない。各関節はサーボモータと減速ギアが用いられており、PID 制御により目標角度を追従している。実験におけるい

Fig. 2 Gorilla III

Fig. 3 Model of humanoid robot

くつかのモータトルクはエンコーダ値と出力電圧から見積もられる。

3. 梯子登りのモデル

3.1 動作基本モデル 本節ではロボットの運動モデルについて述べる。MLRが梯子登りを行うために用いるピッチ軸・ロール軸回転の関節を図3(a)に示す。重心系を表す座標(Σ_{COG})と把持点座標(Σ_{hand})は梯子に乗っている足で、AOYの傾きが最大となる側を原点座標(Σ_0)とした位置から導出され、それぞれの目標軌道を追従する形で逆運動学により各関節角が決定される。梯子登りを行う基本動作設計はSagittal面とLateral面に分離して行い、各面のモデルが逆運動学により組み合わせられ、MLRの3次元運動へと変換される。

脚上昇動作はSagittal面モデルにて、梯子と接触しないような軌道を追従するよう設計される。MLRの

手や足が梯子に接触して目標軌道から大きく外れてしまい、次の梯子ステップを掴むことが不可能となる状況为了避免するような運動かつ追従可能な軌道として、式(1),(2)で示される単純円軌道を選択した。

$$(y_a - y_{pos})^2 + (z_a - z_{pos})^2 = s^2 \quad (1)$$

$$x_a = 0 \quad (2)$$

原点である足を基準として、x軸をMLRの左右方向、y軸を前後方向、z軸を上下方向とし、(x_a, y_a, z_a)は手足の目標軌道座標を表す。 s は梯子のステップ間距離、 y_{pos} , z_{pos} は円のy,z方向中心である。ロボットは胴体と梯子の距離を一定に保った状態で上昇動作を行う。足面は梯子に対して、梯子からの反力が重心方向に向くような角度で接する。これにより足が梯子の奥に滑るのを防ぐことができ、胴体を常に支持できる。

3.2 梯子登りの歩容 梯子上りでの複数の歩容が実現可能であれば、上昇移動環境や上昇速度、安定性などを考慮した適切な歩容を選択することができる。本論文では、一歩行周期において脚が支持している時間の比率であるデューティ比 β と歩容で運動を決定する。梯子登りで手足が梯子と接触している運動は、3点支持の静的な動作であるトランスバース歩容、2点支持はペース歩容やトロット歩容である。各歩容における脚の移動順を図4に時系列的に示す。破線は手が梯子を掴み、胴体を固定する時間を表している。

3.2.1 トランスバース歩容 ロボットが一脚ずつ別々に上昇するこの歩容では、体は常に3点で支えられており、デューティ比 $\beta = 0.75$ の静的な動作である。安定性が最も高く、途中で動作が停止しても胴体が梯子から離れることはない。

3.2.2 ペース歩容 ペース歩容は片側の手足を進行方向へと同時に動かす歩容で、左右の切り替えを周期的に行う。四足歩行で用いられているこの歩容の多くは $\beta = 0.5$ の動的な歩行である。しかし梯子登りにおいては梯子ステップを掴んだり離したりする動作を取り入れなければならない、3点支持期間を含む $\beta > 0.5$ の準動的な歩行となる。ここで準動的と述べるのは、非常に不安定な運動となる2点支持期間が存在するからである。この歩容では、操作者が経験的に上昇速度を決定し、その他パラメータは梯子と干渉しない適切なものを探さなければならない。

3.2.3 トロット歩容 トロット歩容も一般的に $\beta = 0.5$ の動的な歩行である。しかし梯子上りにおけるこの歩容も、ペース歩容と同様に3点支持期間を含む $\beta > 0.5$ の準動的な運動である。ペース歩容と異なる点として、AOYには大きな傾きが存在し、姿勢を保つ

Fig. 4 Gait pattern

制御だけでは胴体が AOY 周りに回転してしまう。そこで、本論文ではロボットを一質点系で考え、運動における加速力を考慮することで、重力と加速力のバランスが保たれるような垂直梯子上昇の運動設計を提案する。

各歩容における上昇動作は、ロボットの AOY 周りの回転を抑制するようなモーメントを生成する姿勢を実現するように設計される。詳細は次節で述べる。

3.3 胴体回転に影響するモーメント 垂直梯子登りと脚立登りでは安定基準のモーメントが全く異なる。ロボットが斜面や脚立を登るとき安定性は二足歩行や四足歩行と同様の振る舞いをするため、動作中には Zero-Moment Point (ZMP) の考察が必要となる。つまり、安定が保たれる目標 ZMP へと実際の ZMP (重心位置) を近づけることで、より安定な運動が可能となる。一方で垂直梯子を登る運動は、重心が常に支持足多角形から離れている。つまり実際の ZMP が目標 ZMP から離れた状態での運動となる。このような状態では、安定のための ZMP 軌道をこの運動に当てはめることはできないために別の運動を作る上での基準が必要となる。そこで本論文では、手足を梯子に固定した姿勢からできる AOY 周りのモーメントに注目し、安定な登り動作の設計を行う。

原点座標から、AOY 周りに発生する回転運動を引き起こすモーメントを以下のように計算する。

$$\mathbf{M} = R_{\theta} \cdot (\mathbf{r}_{hand} \times \mathbf{F}_{r_{hand}} + \mathbf{r}_{leg} \times \mathbf{F}_{r_{leg}} + \mathbf{r}_{COG} \times (\mathbf{F}_{r_g} + \mathbf{F}_{r_{COG}})) \quad (3)$$

$$R_{\theta} = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & -\sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (4)$$

$\mathbf{M} = [M_{pitch}, M_{roll}, M_{yaw}]^T$: AOY 周りのモーメント成分

$\mathbf{r}_i = [x_i, y_i, z_i]^T$: i における座標成分

$\mathbf{F}_{r_i} = [F_{x_i}, F_{y_i}, F_{z_i}]^T$: i における力成分

ここで θ はワールド座標系の z 軸を基準とした AOY の傾きを示す。また、 i は力の加わる点 (手 *hand*, 足 *leg*, 重心 *COG*) のいずれかを示している。重力成分は $\mathbf{F}_{r_g} = [0, 0, -mg]^T$ とする。 m は MLR を一質点系とした時の重量である。胴体回転に影響する AOY 周りモーメントは M_{yaw} であり、次式となる。

$$M_{yaw} = \{-z_{hand}F_{y_{hand}} + y_{COG}(F_{z_{COG}} - mg)\} \sin \theta + (x_{hand}F_{y_{hand}} + x_{leg}F_{y_{leg}} - y_{COG}F_{x_{COG}}) \cos \theta \quad (5)$$

$$\theta = \arctan \left(\frac{x_{hand}}{z_{hand}} \right) \quad (6)$$

ロボットが全体として $M_{yaw} = 0$ 、つまり AOY 周りのモーメントがゼロに近い運動を行うときに、MLR は各歩容を安定に実現できる。このモーメントの条件を考慮して各歩容における MLR の姿勢、運動を決定する。

3.3.1 3点支持登り (両足接触) この静的な上昇動作の拘束条件は、把持する力 $F_{r_{hand}} = 0$ 、重力以外の加速力 $F_{r_{COG}} = 0$ であり、 M_{yaw} は式 (5)(6) より以下のように求まる。

$$M_{yaw} = -y_{COG}mg \sin \theta + x_{leg}F_{y_{leg}} \cos \theta \quad (7)$$

反力 $F_{y_{leg}}$ が十分にかかるとき、全身は3点で支えられておりになり安定な上昇動作が可能となる。 $M_{yaw} = 0$ 、すなわち

$$F_{y_{leg}} = \frac{y_{COG}mg}{x_{leg}} \tan \theta < 0 \quad (8)$$

となる条件を保つ姿勢を考察する。 $F_{y_{leg}}$ の方向は重心に向かっており、足面の向きからその値はマイナスとなる。よって y_{COG} は座標系からマイナスなことから、AOY の傾きを表す θ はプラスの値をとる必要がある。この値を保つことで胴体を梯子に固定することができる。この $\theta > 0$ はロボットの姿勢が $x_{hand} > 0$ の形であることを示す。その足の配置姿勢は、ロボットを Lateral 面から見た時、図 5(a) のような台形となる。

3.3.2 3点支持登り (両手接触) この静的な上昇動作の拘束条件は、踏段する力 $F_{r_{leg}} = 0$ 、加速力 $F_{r_{COG}} = 0$ であり、 M_{yaw} は以下のように求まる。

$$M_{yaw} = (-z_{hand}F_{y_{hand}} - y_{COG}mg) \sin \theta + x_{hand}F_{y_{hand}} \cos \theta \quad (9)$$

$M_{yaw} = 0$ と $\theta > 0$ は常に保たれる形となり、胴体を支える手の力は常に

$$F_{y_{hand}} = \frac{-y_{COG}Mg \sin \theta}{x_{hand} \cos \theta + z_{hand} \sin \theta} > 0 \quad (10)$$

となる。AOY 周りのモーメントの変化はこの支持手の力により作られているが、剛性が弱い多自由度ロボットの運動は容易に不安定になる。

3.3.3 2点支持登り(上昇速度一定でのペース歩容)
加速のない2点支持での静的な上昇動作での拘束条件は $F_{rhand} = 0, F_{rleg} = 0, F_{rCOG} = 0$ であり、 M_{yaw} が以下のようになる。

$$M_{yaw} = -y_{COG}mg \sin \theta \quad (11)$$

この方程式は、AOY の傾き $\theta = 0$ の姿勢を保つときにモーメントがかからないことを示している。このとき、この歩容で上昇している間、手足の間隔は等しく保たれる必要がある。その足の配置姿勢は、ロボットを Lateral 面から見た時、図 5(b) のような長方形となる。

3.3.4 2点支持上昇(加速度考慮トロット歩容)
この歩容での拘束条件は $F_{rhand} = 0, F_{rleg} = 0$ であり、加速力 F_{rCOG} の影響する M_{yaw} を考察する。AOY 上の支持点である手足により生み出される重心の加速力の大きさとその方向を α, ϕ で示す。加速運動は単純化のために、Lateral 面で行われ、加速度一定とし、その時の加速力成分は $F_{rCOG} = [m\alpha \sin \phi, 0, m\alpha \cos \phi]$ と表される。AOY 周りのモーメントは以下ようになる。

$$M_{yaw} = my_{COG}(-g \sin \theta + \alpha \sin(\theta - \phi)) \quad (12)$$

操作する人は表 1 で示す初速度 Initial Velocity(Init V)、目標重心位置 Desired COG Position(Des P)、初期把持位置 Initial Gripping Position(Init GP) をパラメータとして選択する。この表で、左右の初速度を v_{side} 、上昇初速度を v_{up} で表す。これらのパラメータによる x 方向 x_{COG} と z 方向 z_{COG} の重心軌道の式は以下である。

$$x_{COG} = \int_0^t \left(\int_0^t (\alpha \sin \phi) du + v_{side} \right) dt \quad (13)$$

$$z_{COG} = \int_0^t \left(\int_0^t (\alpha \cos \phi - g) du + v_{up} \right) dt \quad (14)$$

ここで u は加速度項の積分、 t を速度項の積分で用いる時間変数を意味する。この式にて、 $x_{COG} = x_{des}$ 、 $z_{COG} = z_{des}$ の条件により、加速値や重心軌道、また梯子の一段上昇時間の計算が可能である。初期把持位置と式 (6) から AOY の傾きを求め、モーメントが発生しない条件式 (12) と目標重心位置を表す式 (13)、(14) を用いて重心軌道と上昇時間を求める。表 1 で示す各式におけるパラメータ ($z_{des}, x_{des}, v_{up}, v_{side}$) を変化させて導出した目標軌道の計算結果を図 6 に示す。この軌道は梯子から手足が離れた2点支持状態での上昇における目標重心軌道である。操作者はこのシミュレ-

(a) Posture of Transverse Gait (b) Posture of Pace Gait

Fig. 5 Basic Posture of Static Gait

Table 1 Parameter of Climbing and Swinging Directions

DIRECTION	Parameters		
	Init V	Des P	Init GP
Climbing(z)	v_z	z_{des}	z_{hand}
Swinging(x)	v_x	x_{des}	x_{hand}

シオン軌道や上昇時間を考慮し、実験によりロボットが安定に上昇できるようなパラメータを経験的に選択する必要がある。

モデルと実機では大きな誤差が存在し、シミュレーション通りの運動実現が実際は実行されず、失敗する場合もある。その状況を認識し回避するための方法を次節で示す。

この運動をあてはめた加速度考慮でのペース歩容は、われわれの用いるロボットの機構では実現不可能である。ロボットの左右運動は肩モータのロール回転により実現されている。トロット歩容では胴体を固定する左右の拘束があるため、重心を左右に動かすことが可能であるが、ペース歩容のように片側のみで固定される運動の場合、モータのロール回転方向に運動が依存してしまい、重心軌道を追従するような運動が実現不可能だからである。

3.4 把持失敗認識と回復動作 梯子ステップの把持動作が失敗となる場合として、以下が考えられる。

- ステップに届かず、掴めない。
- 梯子を不完全把持している。

力センサなど外界センサを使用しないロボットが梯子を適切に掴んだかどうかを理解するのに、手のモータ出力電圧を用いることができる。ロボットが梯子ステップ把持に成功した場合、いくらかの出力電圧の結果が得られる。一方、手の把持が不可能であった場合、出力電圧は把持できた時に比べて非常に小さな値である。もう一方で、もし爪の先が梯子ステップ上に乗った場合などにより、不完全把持となった場合は大きな負荷が手にかかるため、非常に大きな出力電圧が結果として返ってくる。数回の実験による成功時の出力電

Fig. 6 Trajectory of COG Changing Each Parameter

Fig. 7 Recovery Motion Model for Gripping Rung

Fig. 8 Control Flow in Continuous Ladder Climbing

圧値範囲を決定し、その範囲外の電圧時を失敗動作と認識する。ロボットが把持の失敗認識を行い、失敗時には図7に示すような回復動作を行うことで元に戻ることが可能である。1-1のように梯子に接触して完全に掴めなかった場合、手の第1関節以下の距離を上昇させたとしても、胴体のひずみが戻るだけであり、依然として手は梯子ステップと干渉した状態である。第1関節以上の距離を上昇させると、手は1-1,1-2の状態から梯子と干渉しない状態になる。次に手を広げつつ、第2関節以上の距離を梯子奥へ移動させる。最後に元の場所へと手を閉じながら戻す。この動作をロボットが把持成功であると認識するまで繰り返し、確実に梯子ステップを掴んでから次の動作に移るようなコントロールを行なう。その連続梯子登りの運動制御の流れは以下のようなものである(図8)。

1. 基本動作を行う適切なパラメータを与える。

2. 姿勢から AOY の傾きが計算され、パラメータにより重心軌道、一步上昇時間を導出する。
3. ロボットが軌道を追従する。
4. 手の出力電圧から梯子ステップの把持を認識する。
5. 出力電圧の結果から回復動作を行うか決定し、実行する。そののち、ロボットの姿勢から次の運動のためのパラメータを計算する。
6. 2.へ戻る。

回復動作を含めたこの制御の流れを用いた垂直梯子登り動作は実験的に有用であることを確認した。結果を次節で述べる。

4. 実験 実験

4.1 実験環境 実験は Gorilla Robot III を用いて行った。梯子の環境は次の通りである。

- 垂直梯子のステップ間隔はそれぞれ 0.2[m] である。
- ステップの断面は 2×2 [cm²] の正方形で、表面は滑り防止のための平ゴムで覆われている。

この実験では三種類の梯子登り歩容を行い、安定に上昇動作が行われたかを実験時のスナップショットと腰と肩の関節トルク出力から見積もる。

4.2 実験結果

4.2.1 トランスバース歩容 この歩容における姿勢は、 x_{hand} が 0.045[m] を保った台形のような足配置を保つことで梯子から離れる回転を抑えた。上昇速度は 1.67[cm/s] で、一段上昇に 12.0[s] とした。図9はトランスバース歩容での梯子登りのスナップショットを示す。この写真から、胴体の回転なく安定に上昇できていることが見られる。また、この歩容では3点支持が保たれていることが、図10の肩と腰のトルクが分散されていることから理解できる。このように、台形型の足配置がトランスバース歩容による安定な梯子登りの実現に適しているとわかる。

4.2.2 ベース歩容 ベース歩容の場合、MLR が x_{hand} が 0.0[m] の姿勢、つまり手足の間隔が等しい長方形の足配置を保った姿勢での実現を行った。ここで、上昇速度は外乱が起こらない速度を考慮にいれ、経験的に 5.0[cm/s] で行った。この速度でのベース歩容は静的な歩容の 1/3 周期で梯子を上昇することができる。把持に失敗した時、回復動作(図7)が 1.5[s] で行われる。図11はこの歩容での梯子登りの実験スナップショットである。ロボットの振舞いから、外乱が起こらずに連続での安定な梯子登りが実現できているとわかる。また、図12の周期的な出力トルクの結果も上昇中に外乱が生じていないことを示し、この長方形の足配置姿勢がベース歩容の実現に適しているとわかる。

Fig. 9 Snapshots of Transverse gait

4.2.3 トロット歩容 トロット歩容はAOYの傾きがある姿勢での梯子登りであり、その傾きは一步ごとに変化する。姿勢や運動を決定するパラメータは表2に示されており、実験時に計算された把持位置や加速度、上昇時間を表3に示す。一段の上昇時間が他の歩容より短いのが特徴である。トロット歩容での梯子登りは運動計画と制御の一連の流れ(図8)を用いた。図13はトロット歩容での梯子登りの実験スナップショットを示す。胴体の傾きや足位置のずれが発生して、目標重心軌道と実際の重心軌道がずれてしまう場合もあるが、それにより梯子の把持に失敗した場合も、回復動作により梯子を掴み直し、連続での上昇が実現できた。図14の周期的な出力トルクの結果は足の固定の問題と安定を高める回復動作の有効性を示している。肩トルクが腰のトルクより大きく出力しているのは、サル手によって梯子に体を固定しているため、力が加えやすいからである。また、実験時における回復動作を用いた連続梯子登り上昇時の手の出力電圧を図15にて示す。ロボットの手が梯子を把持し終わった時の出力電圧から失敗認識をしているが、その認識は丸で囲まれたグラフの梯子の段数の時間(把持が終了する時間)で行われた。これらの結果から、重心軌道や失敗認識、回復動作を含めた運動の流れによりMLRが安定に連続梯子登りが可能であったことを示した。

Table 2 Parameter of Up and Side Directions

		Parameters		
Step	Direction	Init V[m/s]	Des P[m]	Init GP[m]
1st	Cilmb	0.05	0.1	1.0
	Swing	-0.05	-0.05	0.245
2st	Cilmb	0.05	0.2	1.0
	Swing	0.05	0.05	-
3st	Cilmb	0.05	0.2	1.0
	Swing	-0.05	-0.05	-

Fig. 10 Torque of Transverse Gait

Fig. 11 Snapshots of Pace Gait with Constant Velocity

Fig. 12 Torque of Pace Gait with Constant Velocity

Table 3 Calculated Parameters for Each Step in Trot Gait

Step number	Gripping position[m]	Step period[s]
1st	0.245	2.244
2st	0.237	2.616
3st	0.213	2.568

5. まとめ

本論文では、マルチロコモーションロボットによる3つの歩容(トランスポース、ペース、トロット歩容)による垂直梯子登りを実現した。トランスポース歩容

Fig. 13 Snapshots of Trot Gait with Acceleration

Fig. 14 Torque of Trot Gait with Acceleration

Fig. 15 Output Voltage of Hand in Error Recognition in the case of Trot Gait

やペース歩容などの加速による影響が少ない静的な動作は AOY 周りに生じる重力によるモーメントを考慮した足位置の姿勢を保った運動設計により安定な実現が可能であることを示した。また、トロット歩容での加速する上昇運動を実現する上で、ロボットの胴体が梯子から離れずに運動を続けることができるよう、梯子把持姿勢の AOY の傾きによる胴体回転を引き起こすモーメントが発生しないような理想重心軌道を求めた。その軌道を追従させ、その運動に加えて把持動作の失敗認識と回復動作を含めた一連の運動制御を実機より実現した。さらに機動性が高く、安定した運動を

行うためには環境変化や運動変化が認識できるセンサを用いた認識能力の増加が必要である。今後、外界センサを取り入れた MLR により、環境を認識しつつ、地上での移動方法である二足歩行、不整地や上昇動作での四足歩行、高所の移動形態であるブラキエーションなどを自律的に選択し、遷移動作を行い、様々な環境下で移動可能なロボットの実現を図る。

文 献

- (1) M. Doi, T. Matsuno, Y. Hasegawa and T. Fukuda "Control of the Lateral Motion in biped walking based on the assumption of Point-Contact", *Trans of JSME, Ser.C*(2006)-6, Vol. 72 No. 718, pp.128-135
- (2) Y. Asano, M. Doi, Y. Hasegawa, T. Matsuno, T. Fukuda, "Quadruped Walking by Joint-interlocking Control Based on the Assumption of Point-contact(Comparison between Pace Gait and Crawl Gait Based on the Energy Consumption)" *Trans of JSME, Ser.C*(2007)-1, Vol. 73 No. 725, pp.230-236
- (3) H. Kajima, M. Doi, Y. Hasegawa and T. Fukuda, "A study on a brachiation controller for a multi-locomotion robot - realization of smooth, continuous brachiation", *Advanced Robotics (AR)*(2004), 18(10), pp.1025-1038
- (4) K. Kaneko, F. Kanehiro, S. Kajita, H. Hirukawa, T. Kawasaki, M. Hirata, K. Akachi, and T. Isozumi "Humanoid Robot HRP-2", in *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*(2004), pp.1083-1090
- (5) F. Kanehiro, H. Hirukawa K. Kaneko, S. Kajita, K. Fujiwara, K. Harada and K. Yokoi "Locomotion Planning of Humanoid Robots to Pass through Narrow Spaces", in *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*(2004), pp.604-609
- (6) K. Isler, "Footfall Patterns, Stride Length and Speed of Vertical Climbing in Spider Monkeys (*Ateles fusciceps robustus*) and Woolly Monkeys (*Lagothrix lagotricha*)", *Folia Primatol*(2004), 75, pp.133-149
- (7) S. Kim, M. Spenko, S. Trujillo, B. Heyneman, V. Mattoli and M.R. Cutkosky, "Whole body adhesion: hierarchical, directional and distributed control of adhesive forces for a climbing robot" in *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*(2007), pp.1268-1273
- (8) G.C. Haynes and A. Rizzi, "Gait Regulation and Feedback on a Robotic Climbing Hexapod", in *Robotics: Science and Systems*(2006), Philadelphia
- (9) H. Iida, H. Hozumi and R. Nakayama, "Development of Ladder Climbing Robot LCR-1" *Journal of Robotics and Mechatronics*(1989), Vol.1, No.4, pp. 311-316
- (10) B.L. Luk, D.S. Cooke, S. Galt, A.A. Collie and S. Chen, "Intelligent legged climbing servicerobot for remote maintenance applications in hazardous environments", *Robotics and Autonomous Systems*(2005), 53 (2), pp.142-152
- (11) S. Fujii, K. Inoue, T. Takubo, Y. Mae and T. Arai, "Ladder Climbing Control for Lim Mechanism Robot "ASTERISK" " in *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*(2008), pp.3052-3057
- (12) A. Nagakubo and S. Hirose, "Walking and Running of the Quadruped Wall Climbing Robot" in *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*(1994), Vol2, pp.1268-1273