

## 四脚歩行ロボットのトロット歩容における目標位置への最短時間制御

鈴木 悠平<sup>\*1</sup>, 大隅 久<sup>\*2</sup>

## Time optimal positioning control of a quadruped robot for trot gait

Yuhei SUZUKI<sup>\*1</sup> and Hisashi OSUMI<sup>\*2</sup><sup>\*1,\*2</sup> Chuo University

1-13-27 Kasuga, Bunkyo-ku, Tokyo 112-8551, Japan

Received: 16 January 2017; Revised: 3 March 2017; Accepted: 13 April 2017

## Abstract

A design method of time-optimal trajectory of quadruped robots from an initial position to a target position is developed for trot gait. The designed trajectory consists of three phases, acceleration phase, steady walk phase and deceleration phase. The time-optimal trajectory is designed in each phase and they are integrated so that the robot reaches the target position. Since the fastest walk trajectory in steady walk has already been obtained in our previous research, the time-optimal trajectories in the acceleration and deceleration phases are designed in a similar way to the previous study. First, all the possible trajectories in the search space with which the velocity of the robot reaches the previously obtained maximum velocity are designed in the state space of the robot. Next, they are checked whether the physical constraints and the constraint imposed by swinging legs are satisfied or not. Then the trajectory with the shortest time to reach the maximum velocity is chosen as the time-optimal trajectory among the trajectories satisfying all the constraints. The obtained time-optimal trajectories are tested by a quadruped walking robot SONY ERS-7 and the effectiveness of the developed method of designing time-optimal trajectory is verified.

**Key words :** Quadruped robot, Time optimal control, Trot gait, State transition, Positioning

## 1. 緒 言

脚型の歩行ロボットは、車輪駆動型ロボットでは立ち入れない不整地や段差の多い環境において高い機動性を発揮できることから、これまで多くの研究が行われている。大型障害物の踏破が可能な4足歩行ロボット TITAN XII(小松他, 2014)や原子炉建屋内で利用された4足歩行ロボット(菅沼他, 2014)、フィールドを想定した BigDog(Raibert et al., 2008)などがその例である。しかし、歩行ロボットは一般に制御が難しく、移動速度にも限界がある。このうち、安定した歩行のための制御法としては、動歩行時の安定性向上のための制御手法(倉爪他, 2001)(水戸部他, 2000)等、多くの研究がある一方、移動速度に着目した制御法の提案は少ない。MIT で開発された Cheetah(Hyun et al., 2015)やその後開発された Wildcat 等、高速走行を実現したロボットは多い一方、基本的にはジャンプを伴う。このため、ギアを駆動系に持つロボットや、衝撃を和らげるための構造を持たない通常のロボットには適用できず、一般のロボットを速く歩かせるための制御手法の提案とはなっていない。また、階段を利用して建物内を移動する点検ロボット等では、胴体を揺らすことなく安定して歩行することも求められる。これらを踏まえ、筆者らは先行研究(大隅他, 2008)(鈴木他, 2016)において、胴体を水平に移動させることを前提に、トロット歩容に対して ZMP 制御(梶田, 2002)を利用し、理論的な最速歩行動作を導出した。ただし、先行研究は定常歩行のみに限定したものであり、静止状態から最速歩行状態まで加速、最速歩行状態から静止状態まで減速させる状態遷移の過程は扱っていなかった。

そこで本研究では、静止状態から最速歩行状態へ、最速歩行状態から静止状態へ最短時間で歩行させる状態遷

移軌道設計手法を示す。また、先行研究における定常歩行と加速・減速歩行を組み合わせ、任意の目標距離での静止を可能とする。 Trot歩容時のロボット重心の速度軌道は、一定の加減速を繰り返す。この加減速の時間を、各周期で別々の値とすることで、加速や減速ができる。よって、これを数歩利用することで、目標速度、あるいは静止状態まで最短時間で遷移可能なパターンを探索する。一方遊脚に対しては、先行研究と同様 Bobrowらの提案した最短時間制御(Bobrow et al., 1985)(Bobrow, 1988)を応用する。最後に、定常歩行と加速・減速歩行を組み合わせ最短時間で目標距離に静止する状態遷移軌道を求め、提案した状態遷移軌道設計手法の有用性を示す。対象には前報と同様、SONY製の四脚歩行ロボット AIBO “ERS-7”を用いる。

以下、2章においてロボットの運動学モデルおよび動力学方程式を、3章では歩行中の支持脚に課せられる拘束条件を示す。4章では支持脚における静止状態から最速歩行状態までの最短時間加速軌道設計手法および最速歩行状態から静止状態までの最短時間減速軌道設計手法を示す。5章では最短時間制御を用いた加速・減速歩行における遊脚軌道の設計手順と、加減速軌道を含めた任意の目標距離を最短で移動するための軌道の設計手順を示す。6章では本手法を用いたシミュレーション結果と実験機による歩行結果を示し、本手法の有用性を検証する。

## 2. 四脚歩行ロボットの動力学モデル

### 2・1 運動学モデル

本研究では先行研究(鈴木他, 2016)と同じ AIBO “ERS-7”を実験で利用することとし、胴体部の質量に比べて脚部の質量は小さいことから、遊脚の慣性力の胴体運動への影響は無視する。また、直進方向のみの運動を考えるので、それぞれの脚の3関節のうち、2関節のみを制御対象とする。よって、ロボットのモデルは図1のように、後脚接地点をベース、前脚接地点を手先とした5リンクシリアルマニピュレータとしてモデル化できる。図1では遊脚が省略され、支持脚のみが示されている。 $\theta_1$ から $\theta_6$ は直前のリンクから見た各関節の関節角で、 $x$ 軸の向きを $0^\circ$ とし反時計回りを正とする。

歩容にはTrot歩容を採用する。また歩行中は、図2に示す胴体部の高さ $h$ 、姿勢 $\theta_0$ 、および支持脚間距離 $l_0$ を一定に保つものとする。これにより、支持脚間の中点を原点とした重心の進行方向距離を図3(a)のように $s$ とすると、支持脚の全ての関節角度は $s$ の関数となる。また、遊脚の目標軌道は支持脚が地面を離れる瞬間が初期状態、次に接地した瞬間が終端状態となる。また、先行研究(鈴木他, 2016)と同様に初期状態から終端状態までの脚先軌道を2次曲線とする。これより、図3(b)に表すように、脚部の胴体側付け根から見た脚先の進行方向移動距離を $s_s$ とすると、遊脚の各関節角度も $s_s$ で表すことができる。なお、支持脚軌道設計手法と遊脚軌道設計手法については4章と5章にて詳細を述べる。

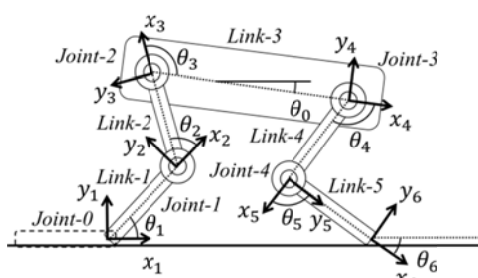


Fig.1 The link model of control object.

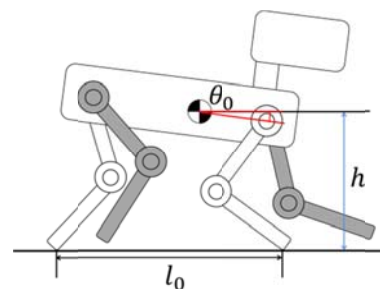
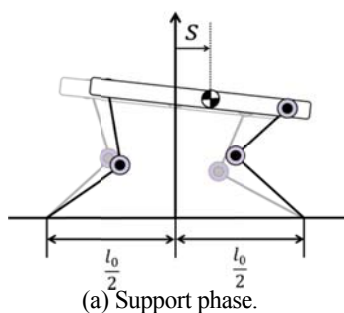
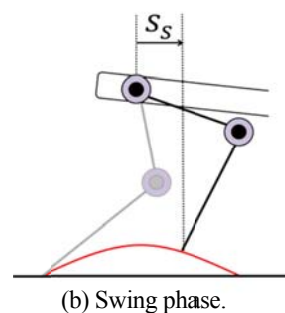


Fig.2 Model of quadruped robot.



(a) Support phase.



(b) Swing phase.

Fig.3 Desired path and distance parameters ' $s$ ' and ' $s_s$ '.

## 2・2 動力学方程式

図1の5リンクシリアルマニピュレータの動力学方程式は式(1)と表すことができる。

$$\begin{aligned}\tau_{sp} &= H_{sp}(\theta_{sp})\ddot{\theta}_{sp} + h_{sp}(\theta_{sp}, \dot{\theta}_{sp}) + J_{sp}^T F_f + g_{sp}(\theta_{sp}) \\ \theta_{sp} &= [\theta_1 \quad \theta_2 \quad \theta_3 \quad \theta_4 \quad \theta_5]^T \\ \tau_{sp} &= [0 \quad \tau_2 \quad \tau_3 \quad \tau_4 \quad \tau_5]^T \\ F_f &= [F_{fx} \quad F_{fy}]^T\end{aligned}\quad (1)$$

ただし、 $H_{sp} \in \mathbf{R}^{5 \times 5}$ は5リンクシリアルマニピュレータの慣性行列、 $h_{sp} \in \mathbf{R}^5$ は非線形項ベクトル、 $F_f \in \mathbf{R}^5$ は前脚での発生力ベクトル、 $J_{sp} \in \mathbf{R}^{2 \times 5}$ はこのマニピュレータのヤコビ行列、 $g_{sp} \in \mathbf{R}^5$ は重力項ベクトル、 $\tau_2$ から $\tau_5$ は関節1から4の発生トルクである。また、ベース関節の発生トルクは0である。 $H_{sp}$ 、 $h_{sp}$ 、 $J_{sp}$ の各成分はマニピュレータの動力学方程式より導出される。これらの項は、一般のシリアルリンクマニピュレータと同様であり、その成分を記載するには数ページを要するため省略する。

## 3. 歩行のための拘束条件

### 3・1 脚先接地点での反力に課せられる拘束条件

前後脚接地点で発生することのできる水平方向の推進力は静止摩擦力以下でなければならない。前脚接地点からの反力ベクトルを $F_f$ 、後脚接地点からの反力ベクトルを $F_r$ とし、それぞれの進行方向成分を $F_{fx}$ 、 $F_{rx}$ 、地面からの垂直成分を $F_{fy}$ 、 $F_{ry}$ とする。この時、式(2)に示す $F_{fx}$ と $F_{rx}$ の合力 $F$ が歩行ロボット全体を駆動するための推進力となる。

$$F = F_{fx} + F_{rx} \quad (2)$$

この前脚と後脚の推進力 $F_{fx}$ と $F_{rx}$ が1:1以外の値を取ると胴体のヨー方向にモーメントが発生するため、これを打ち消すための摩擦力 $F_{fz}$ 、 $F_{rz}$ が脚先に発生する。したがって、脚先が滑らないための摩擦による拘束条件は式(3)となる。

$$-\mu F_{jy} \leq \sqrt{F_{jx}^2 + F_{jz}^2} \leq \mu F_{jy} \quad (3)$$

ここで、 $j = f, r$ でそれぞれ前脚、後脚を指す。 $\mu$ は脚先と地面の間の静止摩擦係数である。

また、式(2)より胴体に目標加速度を発生するための前後脚による推進力には冗長性が存在する。よって、前報と同様に前脚と後脚の推進力 $F_{fx}$ と $F_{rx}$ を動的に変化させることで、拘束条件を緩和しながら加速・減速歩行を実現していく。

### 3・2 加速度軌道に対する歩行実現のための拘束条件

歩行中、ロボットのZMPは支持脚の接地点が作る多角形の中になければならない。トロット歩容の場合、この支持脚多角形は接地脚を結ぶ対角線となる。一方、本ロボットは直線移動するので、重心軌跡を地面に投影した線は、本体中心を通る。よって、安定な歩行には、図4に示すようにZMPが歩行中常に、対角線と中心線の交点となる前後支持脚接地点の midpoint となっている必要がある。これより、軌道上の水平方向加速度 $\ddot{s}$ は式(4)を満たす必要がある。

$$\ddot{s} = \frac{g}{h} s \quad (4)$$

ただし,  $g$ は重力加速度である. 目標の重心軌道は高さ $h$ の水平線上に設定しているので, 重心の位置 $s$ を定めると, その位置で歩行に必要なとなる重心の水平方向加速度も一意に定まる. 式(4)を解くと, 式(5)が得られる.

$$s = \frac{\dot{s}_{min}}{2} \sqrt{\frac{h}{g}} (e^{\sqrt{\frac{g}{h}}t} - e^{-\sqrt{\frac{g}{h}}t}) \quad (5)$$

更に,

$$\dot{s}^2 = \frac{\dot{s}_{min}^2}{4} \left( e^{2\sqrt{\frac{g}{h}}t} + 2 + e^{-2\sqrt{\frac{g}{h}}t} \right) = \dot{s}_{min}^2 + \frac{g}{h} s^2$$

より, 式(6)が得られる.

$$\dot{s} = \sqrt{\dot{s}_{min}^2 + \frac{g}{h} s^2} \quad (6)$$

よって, 例えば定常歩行時における半周期の重心軌道を $s - \dot{s}$ 面に描くと図5の軌道になる. つまり直線歩行の場合, 重心の時間軌道の関数形は $s = 0$ の時の速度と歩幅により決定される. 先行研究(鈴木他, 2016)では, 物理的に実現が可能な最速歩行を達成するための $\dot{s}_{min}$ と歩幅 $T$ を決定するための手法が提案されている. 本研究では, 図6のように赤線の加速部の線長 $s_f$ と青線の減速部の線長 $s_s$ の長さを変えた歩行パターンを利用することにより, 最短で静止状態から最速歩行状態, 最速歩行状態から静止状態への状態遷移をそれぞれ実現するための軌道設計法を提案する.

### 3・3 アクチュエータトルクによる拘束条件

アクチュエータのDC サーボモータへの印加電圧ベクトルを $\mathbf{V}_{sp}$ , モータの出力トルクベクトルを $\mathbf{\tau}_{sp}$ とすると, 式(7)の関係が成り立つ.

$$\mathbf{V}_{sp} = \mathbf{K}_E \dot{\boldsymbol{\theta}} + \mathbf{R}_a \mathbf{K}_T^{-1} \mathbf{\tau}_{sp} \quad (7)$$

ここで,  $\mathbf{R}_a$ ,  $\mathbf{K}_E$ ,  $\mathbf{K}_T$ はそれぞれ各関節のモータの電気抵抗, 誘起電圧抵抗, トルク定数を対角成分に持つ行列である. 式(7)の $\mathbf{\tau}_{sp}$ に式(1)を代入し, 更に $\boldsymbol{\theta}$ を $s$ の関数として置き換えると, 式(8)の拘束式が得られる.

$$\mathbf{V}_{spmin} \leq \mathbf{c}_{sp1}(s)\dot{s} + \mathbf{c}_{sp2}(s, \dot{s}) + \mathbf{J}_{sp}^T \mathbf{F}_f \leq \mathbf{V}_{spmax} \quad (8)$$

ここで,  $\mathbf{V}_{spmin}$ と $\mathbf{V}_{spmax}$ は支持脚アクチュエータに印加できる電圧の最大値と最小値からなるベクトル,  $\mathbf{c}_{sp1}$ ,  $\mathbf{c}_{sp2}$ はそれぞれ $s$ ,  $s$ と $\dot{s}$ からなる関数を表す.

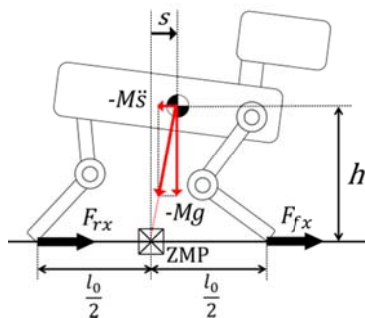


Fig.4 Constraint imposed on ZMP.

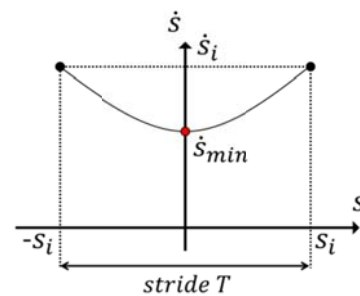


Fig.5 Trajectory shape in  $s - \dot{s}$  phase plane.

以上の式(3),(8)の拘束の下, これから設計していく加速・減速歩行時の各区間の歩行パターンが実現可能かどうかを判別していく.

#### 4. 支持脚における状態遷移軌道設計手法

##### 4・1 位相平面を利用した軌道設計の概要

まず最短時間で状態遷移を達成するための支持脚における軌道設計手法を述べる. 図5に示した Trot 歩容における重心の歩行軌道において, 重心は, 原点左側の  $s$  が負の領域で減速し, 右側の正の領域で加速する. その加速度は  $s$  の増大に伴い大きくなる. よって, 静止状態から最速歩行状態への移行では, 図6(a)に示した軌道のうち, 支持脚と遊脚の切り替わり毎に, 原点左側の  $s_s$  よりも右側の  $s_f$  の値が大きくなる歩行パターンを続ければ良い. その際, 右側の加速区間のみを利用できればより速く目標速度に到達できるので, そのようなパターンを生成する場合には, 図6(b)のように  $s_s$  を負の値とする. これを利用した加速パターンのモデルが図7である. このような重心の軌道を予め位相平面上で設定すると, その軌道が式(3),(8)で示した拘束条件を満足するかどうか, 遊脚が追い付くかどうかを判定することができる. よって, 探索領域内で考えられる全ての重心軌道について, 式(3),(8)の条件を満たし, 更に遊脚動作が支持脚との切り替えタイミングに間に合う軌道を全て求め, その中で加速時間が最短のものを最短時間軌道として決定する. 減速の場合も考え方は同様である.

##### 4・2 加速軌道の設計

図7は静止状態  $\dot{s}_0 = 0$  から目標速度  $\dot{s}_n$  まで  $n$  回支持脚を切り替えることで状態遷移している. この時, 加速に要する線長を  $D_a$  とする. 加速時には  $D_a$  についての拘束は設けない. 一方, 減速時には静止位置が指定されていることを前提とするため, 減速区間の距離として  $D_d$  を拘束条件として与えることとする.

支持脚に切り替わってから次の支持脚に切り替わるまでの区間のうち, 図7のように第  $i$  番目の減速区間の長さを  $s_{si}$ , 加速区間の長さを  $s_{fi}$  とする. なお, 加速区間の途中からスタートする軌道を利用する場合の  $s_{si}$  の値は負とする.

さて, 最初の加速区間の添え字を 1 とし, 第  $i$  番目の区間の減速区間の幅を  $s_{si}$ , 加速区間の幅を  $s_{fi}$  とすると,

$$\dot{s}_{max} = \sqrt{\frac{g}{h} [s_{f1}^2 + s_{f2}^2 + \dots + s_{fn}^2 - (s_{s2}^2 + \dots + s_{sn}^2)]} \quad (9)$$

を満たすように, 各区間の加減速の幅を決定する必要がある. 以下に支持脚側で達成可能な加速軌道の設計手法を示す. まず, 胴体部の高さ  $h$ , 姿勢  $\theta_0$ , 目標速度  $\dot{s}_{max}$ , および支持脚間距離  $l_0$  を, 前報(鈴木他, 2016)の探索で得られた最速歩行のための最適値に設定する. 次に, 切り替え回数が 1 回の場合, 2 回の場合, という順で, 全ての拘束条件を満たす歩行パターンを全探索する. 切り替え回数が 1 回の場合, 初めの一步で最速となる. 但し, 式(3),(8)を満たさないか, 遊脚が間に合わなければ解とはならない. これが解とならない場合には, 2 回で最速となることを仮定し, 探索変数を  $s_{f1}$  と  $s_{s2}$  として数値を離散化し, 式(3),(8)及び遊脚の条件を満たすかを探索範囲内で全探索する. なお  $s_{f2}$  は, 式(9)より  $s_{f1}$  と  $s_{s2}$  によって一意に定まる.

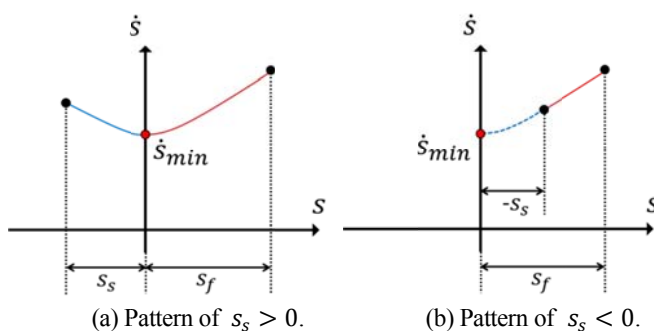


Fig.6 Trajectory shape at acceleration and deceleration.

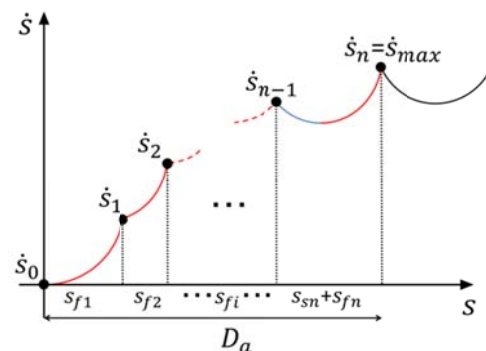


Fig.7 Acceleration in the shortest time.



全ての条件が見つからなかった場合には、切り替え回数を3回とし、変数を $s_{f1}$ ,  $s_{s2}$ ,  $s_{f2}$ ,  $s_{s3}$ として、実現可能な解が見つかるまで同様の探索を繰り返す。最初に解が見つかった切り替え回数の中で、遷移が最も短時間で達成されるものを、最短の加速軌道の候補とする。次に、切り替え回数を更に1回増やし再び探索を行う。その際、探索変数に値を代入すると区間毎に必要な時間が逆算できるので、加速に必要な時間が、それまで得られた加速時間を超える変数の値の組は探索候補から外す。これにより探索領域が大幅に削減できる。そして、切り替え回数を増やしても新たな解が見つからなくなったところで探索を終了し、それまでに見つかった最短の加速軌道を解とする。

#### 4・3 減速軌道の設計

減速軌道生成の基本的な方法は加速の場合と逆となる。ただし、減速の場合には目標静止位置も指定されるため、減速する期間の移動距離も拘束条件として付加される。なお、ここでは減速開始のタイミングは定常歩行での支持脚、遊脚切り替えのタイミングを初期状態とし、そこから静止までの軌道を設計する。図8は最速歩行状態から静止状態に到達するまでの様子の一例である。減速前は定常歩行を行っており、その後最速状態 $\dot{s}_0$ から目標速度0まで支持脚を $n$ 回切り替えて静止状態まで遷移する。この時、減速に必要な線長 $D_d$ に対して

$$s_{s1} + s_{f1} + s_{s2} + s_{f2} + \cdots + s_{f(n-1)} + s_n = D_d \quad (10)$$

が必要である。更に、加速と同様、速度についての拘束条件は式(11)のように表される。

$$\dot{s}_n = \sqrt{\dot{s}_{max}^2 + \frac{g}{h} [s_{f1}^2 + s_{f2}^2 + \cdots + s_{f(n-1)}^2 - (s_{s1}^2 + s_{s2}^2 + \cdots + s_{sn}^2)]} = 0 \quad (11)$$

以下に支持脚側で達成可能な減速軌道の設計手法を示す。まず、胴体部の高さ $h$ 、姿勢 $\theta_0$ 、初期速度 $\dot{s}_{max}$ 、および支持脚間距離 $l_0$ を加速時と同じ値とする。また、本研究では距離調整は減速側で行うこととし、減速期間で進むべき距離 $D_d$ を指定する。次に、加速時と同様、支持脚の切り替え回数に合わせて各区間の加速幅、減速幅を $s_{fi}$ ,  $s_{si}$ として、実現可能な幅で探索範囲を決定し、式(10),(11)を満たす変数の数値の組み合わせを全て並べ、それらを利用した軌道が式(3),(8)を満たすかを判別し、満たす場合は遊脚が間に合うかどうかを調べる。遊脚が間に合うと、これは実現可能な減速軌道となるので、静止に掛かった時間を求める。得られた実現可能な減速軌道の中で、静止までの時間が最短のものが最短時間軌道となる。探索のための切り替え回数の扱いも加速軌道設計と同じである。なお、減速期間で移動距離が指定された場合、この距離が短すぎると、もはや切り替え回数に関係無く解が存在しなくなる。そのため、加速時の設計と同様、拘束条件から式(10)を除き、式(11)を満たす実現可能な解を全て求め、その中で移動距離が最短のものを調べ、これを $D_{dmin}$ としておく。 $D_d$ を指定する際には、 $D_{dmin}$ よりも大きな値としておく必要がある。

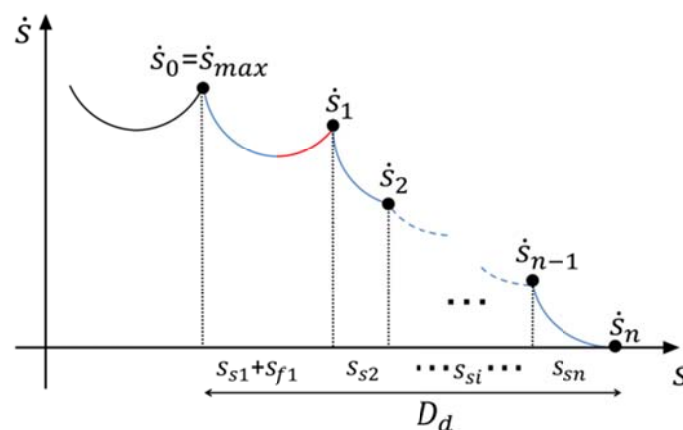


Fig.8 Deceleration in the shortest time.

## 5. 状態遷移時の遊脚軌道の設計

### 5・1 遊脚の動力学方程式

遊脚は ZMP や摩擦の制約を受けないので, 先行研究(鈴木他, 2016)と同様に, 2 リンクシリアルマニピュレータが初期状態から終端状態まで最短時間で遷移する軌道を扱った Bobrow らの最短時間制御手法を用いる. 図 9 が遊脚の 2 リンクモデルである. 前後脚それぞれの動力学方程式は式(12)と表すことができる.

$$\tau_{swi} = H_{swi}(\theta_{swi})\ddot{\theta}_{swi} + h_{swi}(\theta_{swi}, \dot{\theta}_{swi}) + g_{swi}(\theta_{swi}) \quad (12)$$

ただし,  $i = r, f$  で

$$\begin{aligned} \theta_{swr} &= [\theta_{swr1} \quad \theta_{swr2}]^T \\ \theta_{swf} &= [\theta_{swf1} \quad \theta_{swf2}]^T \\ \tau_{swr} &= [\tau_{swr1} \quad \tau_{swr2}]^T \\ \tau_{swf} &= [\tau_{swf1} \quad \tau_{swf2}]^T \end{aligned}$$

である.  $H_{swi} \in \mathbf{R}^{2 \times 2}$  は前後脚に対応する 2 リンクシリアルマニピュレータのそれぞれの慣性行列を,  $h_{swi} \in \mathbf{R}^2$  は非線形項ベクトルを,  $g_{swi} \in \mathbf{R}^2$  は重力項ベクトルを表す.  $H_{swi}$ ,  $h_{swi}$  の各成分はマニピュレータの動力学方程式より導出される. 前後肩位置をベースとしたそれぞれの脚先水平位置  $s_{si}$  とマニピュレータの関節角度  $\theta_{swi}$  の関係は逆運動学により次式に書き換えることができる.

$$\theta_{swi} = \theta_{swi}(s_{si}) \quad (13)$$

この式を 2 階微分することで脚先の加速度  $\ddot{s}_{si}$  が次のように表される.

$$\ddot{\theta}_{swi} = K_{i1}(s_{si})\ddot{s}_{si} + K_{i2}(s_{si}, \dot{s}_{si}) \quad (14)$$

ここで,  $K_{i1} \in \mathbf{R}^2$ ,  $K_{i2} \in \mathbf{R}^2$  は, それぞれ各成分が  $s_{si}$ ,  $s_{si}$  および  $\dot{s}_{si}$  の関数からなるベクトルである. 式(12)に式(13), (14)を代入し, 遊脚のトルクベクトルを  $s_{si}$  で表したのが式(15)である.

$$\tau_{swi} = H_{swi}(s_{si})K_{i1}(s_{si})\ddot{s}_{si} + H_{swi}(s_{si})K_{i2}(s_{si}, \dot{s}_{si}) + h_{swi}(s_{si}, \dot{s}_{si}) \quad (15)$$

これより, 拘束条件により得られるトルク限界により加速度  $\ddot{s}_{si}$  は式(16)のように制限される.

$$\tau_{imin} - H_{swi}(s_{si})K_{i2}(s_{si}, \dot{s}_{si}) - h_{swi}(s_{si}, \dot{s}_{si}) \leq H_{swi}(s_{si})K_{i1}(s_{si})\ddot{s}_{si} \leq \tau_{imax} - H_{swi}(s_{si})K_{i2}(s_{si}, \dot{s}_{si}) - h_{swi}(s_{si}, \dot{s}_{si}) \quad (16)$$

この式(16)の範囲の下で, 加速度  $\ddot{s}_{si}$  の最大値, 最小値を利用した遊脚の最短時間軌道設計を行う. なお, 遊脚モデルにおいては胴体部加速度  $\ddot{s}$  の影響も存在するが, 脚先における加速度  $\ddot{s}_{si}$  と比べて小さいとみなし考慮しない.

### 5・2 遊脚脚先の目標軌道

ロボットの歩行には支持脚と遊脚は連動するので, 遊脚の初期・終端条件は支持脚と遊脚の切り替え時の状態により決定される. また, 本研究では移動の際の地面との接触を避けるために, 遊脚の移動軌道に地面と垂直方向に高さ変位  $s_{yi}$  を持った, 式(17)の 2 次曲線軌道を採用する.

$$s_{yi} = H - a(s_{si} - k)^2 \quad (17)$$

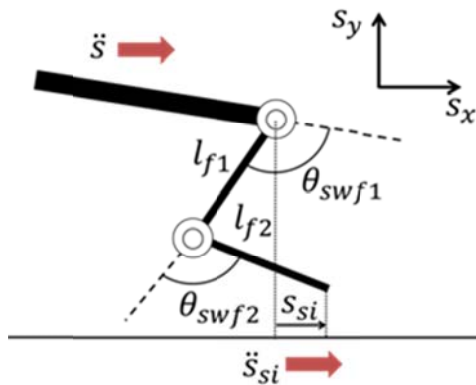


Fig.9 Kinematic model of swing legs.

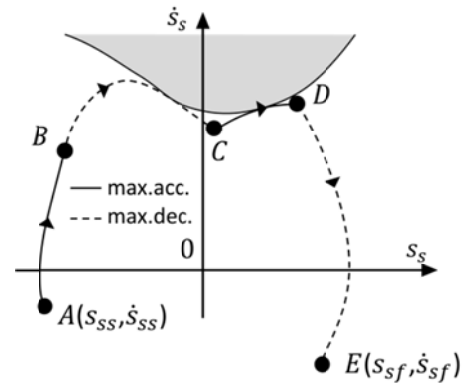


Fig.10 Time optimal trajectory for swinging legs.

$H$ は最大脚上げ高さで、 $a$ 、 $k$ は境界条件により定量的に導出さる。この式の $H$ が大きな値を持つほど地面と脚先の距離が大きくなる一方、遊脚の移動距離が伸び移動に要する時間も長くなることから、引きずりの無い範囲でできるだけ小さな値とする。

### 5・3 遊脚の最短時間制御による設計

図 10 を用いて  $s_s - \dot{s}_s$  平面における最短時間制御則による設計手法を示す。図 10 の網掛け部は式(16)を満たさない領域となる。初期状態 A および終端状態 E は支持脚との切り替え時に撃力が発生しないよう連続的な遷移を前提とするので、支持脚の初期・終端条件より与えられる。以下に設計法を述べる。まず、初期状態と終端状態を点 A, E とする。次に、A より式(16)を満たす範囲の最大加速度で加速をした時の軌道を描く。軌道が制限領域に達する前に切り替え点 B で最大減速に加速度を切り替える。この時、軌道が境界線と接するように切り替え点 B を決定する。また、終端状態 E からは最大減速した場合の軌道を時間を遡って描く。次に境界と交わる手前の点で、最大加速度が境界に接しながら到達する点を求め、これを D 点とする。この最大加速度軌道と、B 点からの最大減速軌道の 2 つの軌道が交わる点を C とする。図の例では、このように B, C, D でそれぞれ加速度を加速から減速、減速から加速、加速から減速と 3 回切り替えることで遊脚の最短時間軌道を得ることができる。実際のシステムでも切り替えは 3 回となっている。この初期状態から終端状態までに要する時間を  $t_{sw}$ 、支持脚移動に要する時間を  $t_{sp}$  とすると、歩行成立のためには式(18)となる必要がある。

$$t_{sw} \leq t_{sp} \quad (18)$$

### 5・4 最適時間軌道の設計

これまでの手順を纏めると、静止した初期位置から目標距離だけ最短時間で移動して静止するための軌道設計手順は以下の通りとなる。なお、 $D_{min}$  は 4・3 の手順で予め求められているものとする。また、目標移動距離は、加速に必要な距離、及び減速に必要な最低限の距離の合計よりも十分に大きいとする。

- (1) 目標とする距離を決定する。また、先行研究における最速歩行条件より胴体部の高さ  $h$ 、姿勢  $\theta_0$ 、支持脚間距離  $l_0$ 、歩幅  $T$ 、加速の終了速度および減速の開始速度  $\dot{s}_{max}$  を指定する。
- (2) 加速に必要な支持脚切り替え回数を  $k$  回とする。ただし初回は  $k = 1$  とする。
- (3) 支持脚の第  $i$  区間の減速区間の幅、加速区間の幅をそれぞれ  $s_{si}$ 、 $s_{fi}$  とする。ただし、 $s_{s1} = 0$  とする。
- (4) (3) の変数に適当な数値を代入する。ただし  $s_{fk}$  は式(7)より残りの変数より一意に定まるので指定しない。
- (5) (4) で代入した数値について、全ての区間で式(3),(8)が満たされるか判別する。満たされない場合は(4)に戻り新たな数値を変数に代入する。満たされる場合には(6)の手順に進む。
- (6) 各区間で支持脚の移動に必要な時間および遊脚の歩幅を導出し、遊脚が時間内に歩幅を達成可能であるか判別する。達成不可能の場合は(4)に戻り新たな数値を変数に代入する。
- (7) (4)～(6)を繰り返し、探索範囲として設定した数値の全ての組み合わせについて、(6)を満たすパターンを全て求める。その中で、式(3),(8)と遊脚の条件を全て満たす数値の組み合わせが存在しない場合には、(2)



- に戻り  $k = k + 1$  として、以下同じ手順を繰り返す。解が存在する場合には、その中で最も加速時間が短いパターンを最短時間加速軌道の候補とし、(8)に移る。
- (8) 更に  $k = k + 1$  とし、探索範囲を加速時間が最短時間加速軌道候補以下となる範囲に狭め、(4)～(6)を繰り返す。
- (9) 新たな解が得られたら、(8)に戻る。新たな解が見つからない場合には、それまでの最短時間加速軌道を最適解として決定し、それに要する距離  $D_a$  を求め、ステップ(10)に移行する。
- (10) 定常歩行の歩幅  $T$  は先行研究で求められているため、 $D_a$ 、 $D_{amin}$  と  $T$  の整数倍の合計が、目標移動距離を超えない最大歩数を求める。
- (11) 目標移動距離と(8)で決定される移動距離の差を減速側の線長  $D_d$  として指定する。
- (12) 減速に必要となる支持脚切り替え回数を  $k$  回とする。ただし初回は  $k = 1$  とする。
- (13) 減速時の支持脚の第  $i$  区間の減速区間の幅、加速区間の幅をそれぞれ  $s_{si}$ 、 $s_{fi}$  とする。ただし、 $s_{fk} = 0$  とする。
- (14) (13)の変数に適当な数値を代入する。ただし  $s_{sk}$  は式(10),(11)より残りの変数で一意に定まるので指定しない。
- (15) (14)で代入した数値について、全ての区間で式(3),(8)が満たされているか判別する。満たされていない場合は(14)に戻り新たな数値を変数に代入する。
- (16) 式(3),(8)を満たすパターンについて、各区間で支持脚の移動に必要な時間および遊脚の歩幅を導出し、遊脚が間に合うかを判別する。間に合わない場合には(14)に戻り新たな数値を変数に代入する。
- (17) (14)～(16)を繰り返し、(16)を満たすパターンの中で最も合計時間が短いパターンを最短時間減速軌道の候補とする。
- (18) 更に  $k = k + 1$  とし、探索範囲を減速時間が最短時間軌道候補以下となる範囲に狭め、(13)～(16)を繰り返す。
- (19) 新たな解が得られたら、(18)に戻る。新たな解が見つからない場合には、それまでの最短時間減速軌道を最適解として決定し、探索を終了する。

## 6. 状態遷移歩行シミュレーション

### 6・1 ロボットのパラメータ

これまで述べた手法を SONY 製の四脚歩行ロボット AIBO “ERS-7”に適用する。図 1 におけるロボットの各パーツのパラメータが表 1、各関節のサーボモータ特性が表 2 である。

Table 1 Parameters of robot legs.

	Link-1	Link-2	Link-4	Link-5
Length[m]	0.0794	0.0695	0.0695	0.0767
Mass[kg]	0.06	0.06	0.06	0.06

Table 2 Parameters of joint actuators.

	Joint-1	Joint-2	Joint-3	Joint-4
$V_{max}$ [V]	7.4	7.4	7.4	7.4
$K_e$ [Nm·s/rad]	1.28	1.39	1.39	1.28
$K_t$ [Nm/A]	1.28	1.39	1.39	1.28
$R_a$ [Ω]	8	8	8	8

Table 3 Optimal parameters of robot pose.

$\mu$	0.45
$h[\text{mm}]$	128
$\theta_0[\text{deg}]$	-4
$l_0[\text{mm}]$	140
$H[\text{mm}]$	15
Sampling time [ms]	8

Table 4 Parameters of each step at acceleration.

$i$	$s_s[\text{mm}]$	$s_f[\text{mm}]$	$\dot{s}_i[\text{mm/s}]$	$s_{sw}[\text{mm}]$	$t_{sp}[\text{ms}]$	$t_{sw}[\text{ms}]$
1	0	26	228	21	544	544
2	-10	40	408	44	104	104
3	18	39	508	71	144	144
Total	113				792	792

Table 5 Parameters of each step at deceleration.

$i$	$s_s[\text{mm}]$	$s_f[\text{mm}]$	$\dot{s}_i[\text{mm/s}]$	$s_{sw}[\text{mm}]$	$t_{sp}[\text{ms}]$	$t_{sw}[\text{ms}]$
1	31	27	491	63	128	128
2	32	26	463	63	136	136
3	36	-1	340	48	96	96
4	22	0	280	31	80	80
5	32	0	4	31	560	560
Total	205				1000	1000

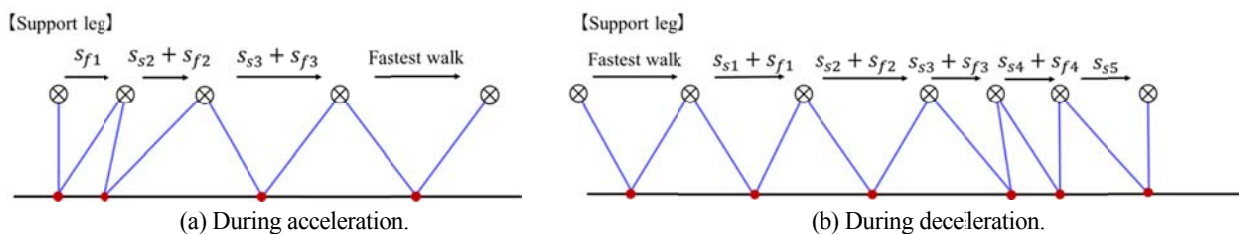


Fig.11 Obtained pattern of time optimal state transition trajectory of the center of gravity.

## 6・2 最短時間加速・減速軌道パターンの決定

ここでは、4 章、5 章で述べた設計手法をもとに最短時間で加速・減速可能なパターンを探索する。なお、定常歩行時におけるロボットの姿勢パラメータは表 3 の通りである。 $H$ は予備実験により決定した。歩行実験においても表 3 のパラメータを採用する。式(3),(8)の拘束条件などからパターンの探索上限は 50mm とし、探索刻みは $s_{si}$ ,  $s_{fi}$ 共に原点付近の $\pm 15\text{mm}$ までは 0.2mm ごと、その他の範囲は 1mm ごととする。また、先行研究より加速・減速歩行における最高速度 $\dot{s}_{max}$ は 508.4mm/s, 定常歩行の支持脚步幅  $T$ は 62mm, 周期時間は 136ms である。

表 4, 5 がそれぞれ目標静止距離 1m とした時の加速・減速軌道の各周期のパターンの探索結果である。得られた歩行パターンを図 11 に図示する。加速では 3 回の切り替えで目標速度に到達し、加速区間の移動距離は 113mm, その間の時間は 792ms と求まった。定常歩行は 11 歩分となる距離 682mm で、定常歩行時間は 1496ms である。減速では 5 回の切り替えで静止し、その間の移動距離は 205mm, 時間は 1000ms となった。なお、最短減速距離である $D_{dmin}$ は 168mm である。以上より、静止状態から静止状態への 1000mm の移動最短時間は 3288ms と求まった。

### 6・3 歩行実験

ここでは、6・2 で得られた最適軌道による歩行実験を行った。サーボ系については AIBO に付属の位置制御系を使用し、予め得られた最適軌道の関節角を時々刻々与えることで歩行を実現した。

歩行距離の測定には高速度カメラによる画像解析を用いた。撮影用カメラには Point Grey 社製の単眼カメラ FL3-FW-03S1C-C を、そして画像解析ソフトとして nac 社製の MOVIAS NEO V3 (2D 版)を用いる。図 12 は撮影時の歩行環境を簡易的に表したもので、ロボットを真上から撮影するためにカメラをコースの上に設置し、ロボットは布に覆われた水平な木板の上を走行する。なお、カメラのサンプリング周波数は 60 Hz である。

図 13, 14 が理論と実測結果である。移動距離は 1/60 秒ごとの変位量の合計値より算出した。図 13 に示したように理論歩行距離 1000mm に対し、実測歩行距離は約 991mm であり理論の約 99%を達成している。また、歩行中の一部を拡大することにより、わずかではあるが加減速を繰り返している様子がわかる。ただし、理論値、実験値ともに、最大速度と最低速度の差はほとんど見られない。これは、1 歩当たりの時間が 136ms と非常に短いためである。図 14 は、設計した位相空間での理論値と実験値の比較である。これより、実験の軌跡にはかなりのノイズが見られるが、歩幅と速度の軌道はおおよそ追従されていることが分かる。実験では一歩の間に細かな加減速が見られる。これは、理論では無視した遊脚の動力学的な影響と考えられる。ただし、加減速の影響はある程度相殺されており、歩行の平均速度に対する影響は小さい。なお、加速区間の速度に遅れが見られるが、これは使用したサーボ系に起因しているものと考えられる。ロボットに付属の位置制御系では、偏差に応じたトルクが出力される。このため、大きなトルクを必要とする加減速の区間での偏差がどうしても大きくなるからである。

別の移動距離に対する実験として目標静止距離 1100mm の場合も検証した。1100mm では加速は 1000mm と同様の 3 回の切り替えパターンが得られ距離 113mm, 時間 792ms となり、定常歩行は 13 歩分となる距離 806mm, 時間 1768ms, 減速は 4 歩で距離 181mm, 時間 984ms となった。各周期のパターンは紙面の都合により割愛する。

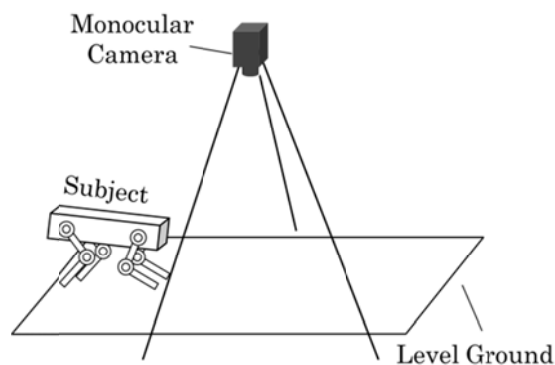


Fig.12 system.

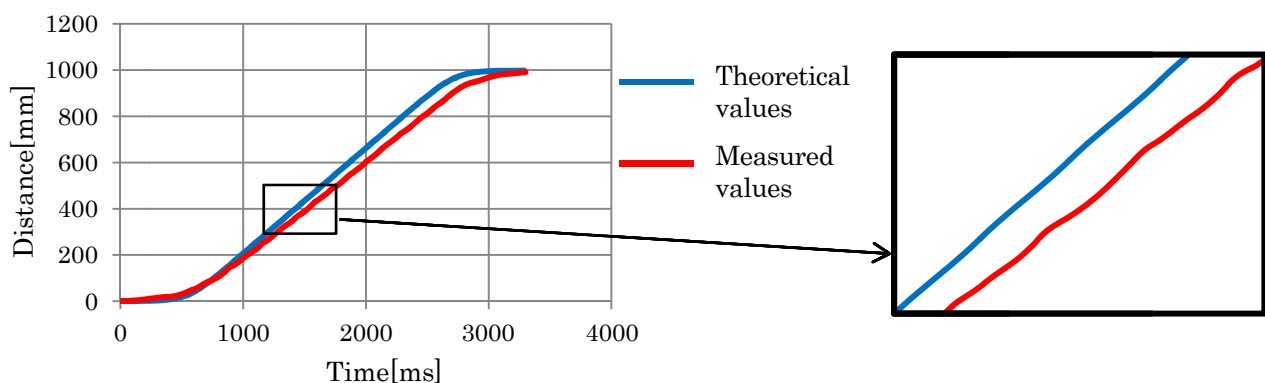


Fig.13 Theoretical walking distance and measured walking distance. The designed trajectory is the blue line and the measured trajectory is the red line. Since the period of walking is very short as 136ms, the change of the velocity is also very small.

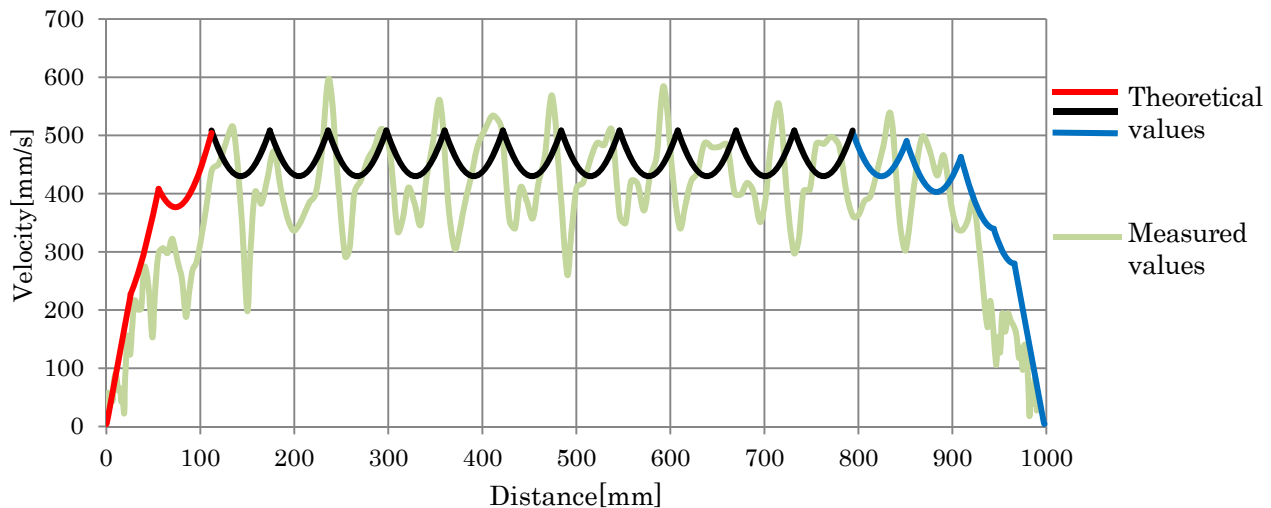


Fig.14 Theoretical walking velocity and measured walking velocity. The red and blue lines are the designed velocities for acceleration and deceleration respectively, and the black line is the designed velocity for the steady walking. The green line indicates the measured velocity. There are some differences between the designed velocity and the measured one due to the neglected dynamic effects of the swinging legs, but both walking periods are almost the same and the average velocities during a period of walking are similar.

歩行実験は4回行い、移動距離は1000mmの時と同様に1/60秒ごとの変位量の合計値より算出した。理論歩行距離1100mmに対し、実測歩行速度の平均は約1086.9mmでありこちらも理論の約99%を達成している。以上の結果より、実際のロボットにおいて本手法が十分有効であることが確認された。

## 7. 結 言

静止状態にある四脚歩行ロボットに目標の静止位置を与え、その間の移動を最短で行うことのできる軌道設計法を提案し、その妥当性を検証した。先行研究(鈴木他, 2016)で求めた定常状態での最速歩行を利用し、静止状態から最速歩行状態、最速歩行状態から目標静止位置へのそれぞれの遷移に対して最短時間軌道を設計することで、最短での位置決め制御を実現した。静止から最速、最速から静止への状態遷移では、まず、遷移に必要な支持脚切り替え回数と加速、減速区間の歩幅を、状態遷移軌道を決定するパラメータとした。遷移軌道が位相平面で設定されると、その軌道が脚先摩擦条件、出力限界条件を満たし、なお且つ遊脚の間に合う軌道であるかを確認することで実現可能かどうか判定できる。よって、全探索によって最短時間での遷移軌道を得ることができる。この手法を実機に適用した結果、実測歩行距離が理論歩行距離の約99%を達成し、本設計手法の妥当性を確認した。このような脚型ロボットの静止状態から静止状態への最短時間に関する研究はこれまで例が無い。加減速を考慮せず定常歩行指令のみを与えた場合を想定すると、脚先の滑りやトルク不足により安定した歩行ができず、歩幅調整もできないため正確な目標距離の達成も難しい。したがって本研究成果には大きな意義がある。軌道に曲線がある場合の最短時間軌道設計が今後の課題である。

## 文 献

- Bobrow, J.E., Dubowsky, S. and Gibson, J.S., Time-optimal control of robotic manipulators along specified paths, The International Journal of Robotics Research, Vol.4, No.3 (1985), pp.3-17.
- Bobrow, J.E., Optimal robot path planning using the minimum-time criterion, IEEE Journal of Robotics and Automation, Vol.4, No.4 (1988), pp.443-450.
- Hyun, D.J., Seok, S., Lee, J. and Kim, S., High speed trot-running: Implementation of a hierarchical controller using proprioceptive impedance control on the MIT Cheetah, International Journal of Robotics Research, Vol.33(2015), pp.1417-1445.

- 梶田秀司, ゼロモーメントポイント (ZMP) と歩行制御, 日本ロボット学会誌, Vol.20, No.3 (2002), pp.229-232.
- 小松洋音, 尾形勝, 程島竜一, 遠藤玄, 福島 E. 文彦, 広瀬茂男, 4足歩行ロボット TITAN XII の開発とその大型障害物踏破制御に関する基礎的研究, 日本機械学会論文集, Vol.80, No.813 (2014), DOI: 10.1299/transjsme.2014dr0128.
- 倉爪亮, 葉石敦生, 米田完, 広瀬茂男, 4足歩行機械の動歩行時の姿勢安定化制御, 日本ロボット学会誌, Vol.19, No.3 (2001), pp.380-386.
- 水戸部和久, 矢島克知, 那須康雄, ゼロモーメント点の操作による歩行ロボットの制御, 日本ロボット学会誌, Vol.18, No.3 (2000), pp.359-365.
- 大隅久, 神谷昌吾, 長谷川悠史, 梅田和昇, 上田隆一, 新井民夫, 四足歩行ロボットの最短時間制御, 日本機械学会論文集 C 編, Vol.74, No.742 (2008), pp.1501-1507.
- Raibert, M., Blankespoor, K., Nelson, G., Playter, R. and the BigDog Team, BigDog, the rough-terrain quadruped robot, Proceedings of the 17th World Congress The International Federation of Automatic Control (2008), pp.10822-10825.
- 菅沼直孝, 上原拓也, 中村紀仁, 原子炉建屋内の運搬作業を担う 4 足歩行ロボットの制御技術, 東芝レビュー, Vol.69, No.10(2014), pp.48-51.
- 鈴木悠平, 大隅久, 岩田雅史, 脚関節トルクの冗長性を利用した四脚ロボットのトロット歩容における最速歩行制御, 日本機械学会論文集, Vol.82, No.842 (2016), DOI:10.1299/transjsme.16-00230.

## References

- Bobrow, J.E., Dubowsky, S. and Gibson, J.S., Time-optimal control of robotic manipulators along specified paths, The International Journal of Robotics Research, Vol.4, No.3 (1985), pp.3-17.
- Bobrow, J.E., Optimal robot path planning using the minimum-time criterion, IEEE Journal of Robotics and Automation, Vol.4, No.4 (1988), pp.443-450.
- Hyun, D.J., Seok, S., Lee, J. and Kim, S., High speed trot-running: Implementation of a hierarchical controller using proprioceptive impedance control on the MIT Cheetah, International Journal of Robotics Research, Vol.33(2015), pp.1417-1445.
- Kajita, K., Zero-moment point (ZMP) and walking control, Journal of the Robotics Society of Japan, Vol.20, No.3 (2002), pp.229-232 (in Japanese).
- Komatsu, H., Ogata, M., Hodoshima, R., Endo, G., Fukushima, E.F. and Hirose, S., Development of quadruped walking robot TITAN XII and its basic consideration on the control of large obstacle traversing motion, Transactions of the JSME (in Japanese), Vol.80, No.813 (2014), DOI: 10.1299/transjsme.2014dr0128.
- Kurazume, R., Haishi, A., Yoneda, K. and Hirose, S., Stabilizing control for dynamically stable walking of quadruped walking robot, Journal of the Robotics Society of Japan, Vol.19, No.3 (2001), pp.380-386(in Japanese).
- Mitobe, K., Yajima, K. and Nasu, Y., Control of walking robots by manipulating the zero moment point, Journal of the Robotics Society of Japan, Vol.18, No.3 (2000), pp.359-365(in Japanese).
- Osumi, H., Kamiya, S., Hasegawa, Y., Umeda, K., Ueda, R. and Arai, T., Time optimal control for quadruped walking robots, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C, Vol.74, No.742 (2008), pp.1501-1507 (in Japanese).
- Raibert, M., Blankespoor, K., Nelson, G., Playter, R. and the BigDog Team, BigDog, the rough-terrain quadruped robot, Proceedings of the 17th World Congress The International Federation of Automatic Control (2008), pp.10822-10825.
- Suganuma, N., Uehara, T. and Nakamura, N., Control technologies for quadruped walking robot to facilitate carrying operations in reactor buildings, TOSHIBA REVIEW, Vol.69, No.10(2014), pp.48-51(in Japanese).
- Suzuki, Y., Osumi, H. and Iwata, M., Fastest walk control of quadruped robots for trot gait by using torque redundancy of leg joints, Transactions of the JSME (in Japanese), Vol.82, No.842 (2016), DOI: 10.1299/transjsme.16-00230.