馬型 4 足歩行ロボットの開発*

(第 2 報, PONY によるトロット歩行実験)

牧田 忍^{*1}, 西村 大輔^{*2}, 古荘 純次^{*1}

Development of Horse-Type Quadruped Robot

(2nd Report, Experiments of Trot Gait by Quadruped Robot PONY)

Shinobu MAKITA^{*3}, Daisuke NISHIMURA and Junji FURUSHO

^{*3} Department of Computer-Controlled Mechanical Systems, Osaka University,
2-1 Yamadaoka, Suita-shi, Osaka, 565-0871 Japan

The mammals use energy which stored in tendons when they swing their limb. In this paper we concentrate on the gait of the horse, especially a trot. The purpose of this study is to realize horse-like trot gait by a quadruped walking robot. The change of angle of equine fetlock joint makes the tendons stretch. When the tendons stretched, they store up energy. Motion of fetlock joint is not controlled actively by muscles but controlled passively by tendons. Authors have made a horse-type quadruped walking robot PONY. The PONY has actuator systems for fetlock joints which a motor and a spring connected in series. This system corresponds to equine muscles and tendons for example a superficial digital flexor muscle. In this paper, first, simulation experiments showed that effect of the motor-spring system. Next, the PONY realized horse-like trot gait.

Key Words: Moving Robot, Robot, Mechatronics and Robotics, Horse-Type Quadruped Robot, Trot, Tendon, Spring

1. 序

これまでに様々な 4 足歩行ロボットに関する研究が行われてきた^{(2)~(15)}. その中で 4 足歩行ロボットによる動歩行を実現した主な研究は次のようなものがある. 1980 年代半ばには Raibert らが伸縮式の脚を持ち油圧アクチュエータでそれぞれの脚を駆動させるホッピングロボットで 4 脚全てが遊脚となるトロット, ペース, バウンス歩行を実現した⁽³⁾. 同じ頃, 関節型の脚を持つ 4 足ロボット COLLIE-1, COLLIE-2 で三浦らがトロット, ペース歩行に関する研究を行った⁽⁴⁾⁽⁵⁾.

1990 年代に入ると広瀬, 米田らがクロールからトロットへの遷移, 静動融合歩容などに関する研究を行っている⁽⁶⁾⁽⁷⁾. また, 江村ら⁽⁸⁾, 榊原, 菅ら⁽⁹⁾, 滝田, 背戸⁽¹⁰⁾は, トロット歩行制御のために反動フライホイールを用いる方法, 低衝撃軌道を用いる方法, 足首部のアクチュエータを用いる方法をそれぞれ提案した.

また, 木村らは神経振動子を用いてペース, トロツ

トの動歩行⁽¹¹⁾, 不整地での動歩行⁽¹²⁾を実現している. 近年では, パターン発生器を経由した脊髄反射機構を導入して中程度の不整地で生物規範型の動的な適応を自律的に生成させている⁽¹³⁾.

この他に, 受動的な関節を持つ 4 足ロボットによる歩行も行われている⁽¹⁴⁾⁽¹⁵⁾. 古荘, 佐野らは 4 足ロボットでクロールからペースへの遷移, バウンス歩行等を実現している^{(16)~(18)}.

これらの歩行ロボットによる動歩行は, 基本的にはロボット工学的に脚軌道計画を行い, 動歩行を実現したものである. 本研究の目的は馬の肢の構造を分析し, その特徴をとらえた歩行ロボットを開発すること, そして, その開発したロボットで馬の歩行解析データを用いた歩行制御を行うことである. これらの点が, ロボット工学的に行われてきた従来の研究とは異なっている.

第 1 報では, 馬を参考にした歩行システムのモデルを提案し, 弾性要素として働く腱などの軟部組織に蓄えられた弾性エネルギーを利用して受動的に運動を発生させる期間をもつ歩行が可能なる 4 足歩行ロボット PONY の機構開発と制御システムについて報告した.

* 原稿受付 2002 年 5 月 27 日.

^{*1} 正員, 大阪大学大学院工学研究科(〒565-0871 吹田市山田丘 2-1).

^{*2} 大阪大学大学院工学研究科.

E-mail: furusho@mech.eng.osaka-u.ac.jp

Fig. 1 Skelton of horse with outline of contour of body⁽¹⁹⁾

本報では、製作した4足歩行ロボットPONYのトロット歩行のシミュレーションおよび歩行制御実験の報告をする。はじめに、歩行シミュレータを構築した。次に、馬の歩行形態を参考にした制御方式を用いてシミュレーションを行い、4足ロボットPONYで安定な歩行が可能であることを示した。最後に、シミュレーションで使ったものと同じ制御方式、目標軌道を用いて歩行実験を行い、PONYで安定なトロット歩行を実現した。なお、本報で報告するシミュレーションおよび実験の両者において使用した目標軌道は、馬のトロット歩行の軌跡を参考にしたものである。

2. 歩行システムと馬型4足ロボットPONY

2.1 歩行システムのモデル 図1に馬の骨格と歩行システムを構築する際に重要な関節の名前を示す。本研究では中速のトロット歩行時の肢の運動、特に球節の運動に注目しているのでシステムを可能な限り軽量、単純化するために頸を持たないモデルを提案した。また、馬の歩行を解析した結果、一体となって動くと思える骨は一個のリンクとした。その結果、提案する歩行システムのモデルは胴体部一リンク、各脚四リンクから成るものとなった。

さらに、ロボットをより軽くするためにモータと減速機を減らし閉リンク機構を用いて膝関節(stifle)と飛節(tarsus:ヒトの足関節に相当)を連動させた(図2)。図2中の大きな白丸で示した関節はモータで駆動する関節を意味する。黒丸で示した関節はモータとばねを直列に配した駆動機構を持つ。また、ハッチングで示した後脚飛節(tarsus)は膝関節(stifle)と閉リンク機構で連動する。また、馬の肩関節(shoulder)、股関節(hip joint)は三軸性の関節ではあるが前後の振り運動が主で実際には一軸関節に近い。肢の関節のその他のものは一軸関節である蝶番関節である⁽²⁰⁾。

Fig. 2 Model of walking system; Lateral view

Fig. 3 Horse-type quadruped machine PONY

そのため、ここで提案した歩行システムのそれぞれの関節はピッチ軸周りの回転の自由度のみを持つものである。

2.2 球節駆動機構における筋と腱のモデル 球節(fetlock:ヒトの第三指の付け根の関節に相当)においてアクチュエータとしての筋の役割をモータに、弾性要素として作用する腱の役割をばねに担わせることを考えた。その際、筋の端は長い腱になっているので構造上、アクチュエータと弾性要素が直列に繋がっている。そこで、球節駆動機構にはモータとねじりコイルばねを直列に配したモデルを採用した。

2.3 馬型4足歩行ロボットPONY 提案したモデルに基づいて各脚4関節を持つ馬型4足歩行ロボットPONYを設計・製作した(図3)。各リンクはアルミニウム合金で製作した。PONYの重量は約30kg、全長約0.9m、全高約0.63m、全幅約0.51mであり、各リンクの長さはトロット歩行解析に用いた馬の約1/3である。後脚には閉リンク構造を採用しているので駆動する関節数は前脚一脚につき4、後脚一脚につき3である。アクチュエータにはDCサーボモータ(山洋電気製L406-011EL9(60W))を用い、歯車列とタイミングベルト-プーリで減速している。この歩行ロボットPONYは球節にモータとねじりコイルばねを直列に配した駆動機構を持つ。

2.4 馬と4足ロボットPONYの質量分布 サラブレッドの体を大きく5つの部分に分けた各部の質量

と全質量に対するそれらの割合(3頭の平均値)⁽²¹⁾と製作したロボットの各部分に相当する質量と割合を表1にまとめる。

Table 1 Weight and percentage

	Weight of horse		Weight of robot	
	[kg]	[%]	[kg]	[%]
Head and neck	57.7	11.4	—	—
Trunk and tail	415.9	82.5	11.062	37.35
Total forelimbs	14.2	2.8	10.33	34.88
Total hindlimbs	16.3	3.3	8.228	27.78
Total weight	504.3	—	29.62	—

また、文献(21)のデータから求めた馬体の質量中心と製作したロボットの質量中心の矢状面内での水平方向位置を比較すると表2のようになった。これは質量中心が肩関節から胴体部分のどの位置にあるかの割合である。

Table 2 Position of center of mass (Percentage from shoulder joint)

Horse	Robot
36	46

馬は躯体に質量が集中し、肢には全質量の約6%が分布するのみである。それに対し、製作したロボットでは脚部分の質量は全体の約63%を占めている。また、馬は頭と頸部の質量があるため、質量中心は躯体の前方から約36%の位置にあるのに対し、ロボットでは胴体部の前方から約46%の位置にある。このように製作したロボットの各リンクの寸法比は馬のおよそ1/3であるが、現在使用可能なアクチュエータの出力/重量比に限界があるため、質量分布は異なっている。

3. シミュレータ

3.1 モデル化 馬型4足ロボットPONYでのトロット歩行実験を行う準備としてシミュレーションを行った。ここで、簡単のために次の仮定をした。

仮定1 対角線上の脚が同期するトロット歩行では支持脚まわりの回転モーメントは支持脚の組が入れ替わることで大部分が相殺される。この仮定の下、トロット歩行を矢状面内の2次元運動としてモデル化した。

また、脚先端と床面とのグリップについて次の仮定をした。

仮定2 脚先端は床面に着地後、滑ることなく、その点で固定される。

Fig. 4 Generalized coordinates

シミュレーションに使用した係数値を表3～表5にまとめる。表中の l_i は i 番目のリンク長、 m_i は i 番目のリンク質量、 I_i は i 番目のリンクのリンク重心まわりの慣性モーメント、 a_i は i 番目のリンクの胴体部に近い関節からリンク重心までの距離であり、胴体部から遠い関節に向かう方向を正ととった。

Table 3 Fore leg

	$l_i[m]$	$m_i[kg]$	$I_i[Nm^2]$	$a_i[m]$
Upper arm	0.11	1.720	0.0035	-0.05
Forearm	0.175	1.568	0.0017	0.06
Metacarpus	0.117	1.583	0.0031	-0.01
Digit	0.10	0.294	0.0004	0.05

Table 4 Hind leg and body

	$l_i[m]$	$m_i[kg]$	$I_i[Nm^2]$	$a_i[m]$
Thigh	0.12	1.769	0.0035	-0.05
Tibia	0.22	0.451	0.0017	0.10
Metatarsus	0.13	1.573	0.0031	-0.03
Pedal	0.10	0.294	0.0004	0.05
Body	0.60	11.062	0.0170	0.30

Table 5 Reduction ratio and motor inertia

Reduction ratio			
Shoulder	90.2	Hip	90.2
Cubitus	75.4	Stifle	90.2
Carpus	50.0	Tarsus	—
Fetlock (fore)	34.5	Fetlock (hind)	34.5
Motor inertia : $0.11 \times 10^{-5} [N \cdot m^2]$			

シミュレーションに用いたモデルを図4に示す。一般化座標 ξ を次のように採る。

$$\xi = (\theta_1, \dots, \theta_{17}, X, Y, \theta_{m1}, \dots, \theta_{m4})^T \quad (1)$$

ここで、

$\theta_1, \dots, \theta_{17}$: 各リンクの絶対角度,

Fig. 5 Conceptual diagram of drive mechanism for fetlock joints (Enlarged view)

X, Y : 胴体部リンクの後端の座標,

$\theta_{m1}, \dots, \theta_{m4}$: 球節駆動用モータの回転角度.

この系に拘束条件 $\Phi(\xi) = 0$ として採り入れたものは次の四点である.

1. 後脚の閉リンク構造により飛節 (tarsus: ヒトの足関節に相当) の運動が膝関節 (stifle) の運動に連動する拘束. (これはロボットの機構によるもので常に成り立っている.)
2. 支持脚期には脚の先端部が地面のある一点にあるという拘束. (ある脚が遊脚である場合, 脚先端の鉛直方向の座標 y が $y \leq 0$ になれば, この拘束が発生し支持脚となる. 次に, 支持脚の垂直床反力 Λ_{vi} が $\Lambda_{vi} \leq 0$ になれば, この拘束は無くなる.)
3. 球節 (fetlock) の関節角度と球節駆動用モータの回転角度の関係に関する拘束. (動作の概念を図5に示す球節駆動系が (a), (b) の状態である場合に発生する.)
4. 球節 (fetlock) の回転角度に制限があるための拘束. (球節角度がストッパで制限される角度になれば, この拘束は発生する. ストッパからの反力が非正となれば, この拘束は無くなる.)

3.2 運動方程式 前節で述べたように一般化座標を採ると, このシステムの運動方程式は次のように与えられる.

$$A(\xi)\ddot{\xi} + B(\xi, \dot{\xi}) = DT + EA. \quad (2)$$

ただし,

$$E = \left(\frac{\partial \Phi(\xi)}{\partial \xi} \right)^T \quad (3)$$

ここで $A(\xi)$ は慣性行列, $B(\xi, \dot{\xi})$ は向心力, 重力の項から成るベクトル, D は入力行列, T は入力トルクのベクトル, A は未定乗数ベクトルである.

それぞれの拘束条件に対する 未定乗数はその拘束を発生させるのに必要な力またはトルクに相当する. 例えば, i 番目の脚が支持脚の場合, 脚先端位地の鉛直方向と水平方向の拘束条件に対する Lagrange の未定乗数 Λ_{vi} と Λ_{hi} はそれぞれ床反力の鉛直方向成分と水平方向成分に相当する.

また, 球節駆動系のばねの変形により発生するトルクは式 (2) の右辺第一項で考慮した.

次に, シミュレーションを行うにあたり, 脚先端部が着地した瞬間は撃力が働くとは定した. 着地時のシステムの全拘束条件を $\Phi_p(\xi) = 0$ とすると, 撃力に対する Lagrange の方程式は次のようになる.

$$A\dot{\xi}^+ - A\dot{\xi}^- = E_p \Lambda_p, \quad E_p = \left(\frac{\partial \Phi_p(\xi)}{\partial \xi_p} \right)^T \quad (4)$$

ここで $\dot{\xi}^+$ は衝突直後の系の一般化速度ベクトル, $\dot{\xi}^-$ は衝突直前の系の一般化速度ベクトル, Λ_p は着地した脚先端を床面に拘束する撃力を含む拘束力ベクトルである. 拘束条件 $\Phi_p(\xi) = 0$ と式 (4) から衝突直後の系の一般化速度ベクトルは次のようになる.

$$\dot{\xi}^+ = \{I - A^{-1}E_p(E_p^T A^{-1}E_p)^{-1}E_p^T\}\dot{\xi}^- \quad (5)$$

脚先端部と地面との衝突が起これば, 式 (5) から $\dot{\xi}^+$ を求め, これを初期条件として用いて Runge-Kutta-Gill 法で運動方程式の数値解を求めた.

4. シミュレーション

4.1 目標軌跡 本研究の目的の一つは4足ロボットで馬の動きに近づけた歩行を実現することである. そこで, シミュレーションに用いた各関節の目標角度は歩行解析に用いた被験馬のデータを参考にしてロボットの寸法に合わせて縮小したものを基本に作製した. 縮小比は鉛直方向に 1/3, 水平方向に 1/6 とした. 時間スケールはシミュレーションを行った結果, ロボットの各関節駆動用モータが速度飽和によって目標値に追従できないために等倍とした. また, 水平方向の縮小比を 1/6 とした理由は, 駆動用モータの速度飽和に加えて各関節の可動範囲に制限があるためである.

ロボットの各関節目標角度を作る際, 床面に対する指および趾部 (digit または pedal part) の角度および中手部 (metacarpal part) (中足部 (metatarsal part)) と指部 (digit part) (趾部 (pedal part)) のつくる相対角度に注目した. これは, 球節 (fetlock) における弾性要素としての腱の役割を PONY の球節駆動用ばねに行わせるためである.

球節より上部の関節の目標角度は逆運動学で求めたが, 哺乳類の特徴である肘関節と膝関節がそれぞれ内側に曲がる角度⁽²²⁾を選んだ. 用いた目標軌跡を図6に示す. ここでは, この目標脚軌道は馬を参考にして作ったものであり, ロボット工学的に作成する完全に対称な Trot 歩容の目標軌道ではないことを強調しておく.

Fig. 6 Target trajectories for each joint

Fig. 7 Control method of fetlock joint

4.2 制御方式 各関節はPD制御を行った。その際、球節を除いた関節には、前節で述べた目標軌跡から予め作っておいた目標角度を与えた。

一方、球節 (fetlock) の制御方法は他の関節とは異なる。球節 (fetlock) の駆動系にはばねが直列に入る (図5参照)。このばねは自然状態から 20° 変形させた状態で取り付けた。この初期角度 20° が与えられているので、ばねには予め与圧がかかけられている。したがって、図中にAで示す入力軸が反時計回りのトルクを発生している状態 (図5(a))、および入力軸がばねの与圧によるトルクよりも小さな時計回りのトルクを発生している状態 (図5(b)) では入力部Aは出力部Bに押し付けられており、ばねを介さないトルク伝達になっている。図5(c) は入力軸が時計回りの大きなトルクを発生している状態である。この場合は、入力部と出力部の間にばねが直列に入る。このような駆動系を持つ球節は以下のように制御した。球節の制御方法の概念を図7に示す。制御方法は以下の2つに分けられる。

1. 受動運動期 (支持脚期の始まりからばねが初期角度 20° に戻るまで。図5(c)の状態)

この期間、球節 (fetlock) の駆動機構のモータには一定の目標値 (着地したと判定された時のモータの回転角度) が与えられる。したがって、この間はばねのみが球節 (fetlock) の運動に作用し球節の運動は能動的に制御されるのではなく受動的に起こる。

2. 能動運動期 (ばねが初期角度 20° に戻ってから遊

Fig. 8 Reaction force from floor; Virtual components

Fig. 9 Stick diagram

脚期の終わりまで。図5(a), (b)の状態)

この期間は、駆動系は単なる剛体と見なすことができ、球節駆動用モータの回転角度 θ_m と球節関節角度 θ_f には減速比を N とすると $\theta_m = N\theta_f$ の関係がある。そのため球節 (fetlock) の運動はモータで制御され予め与えられた目標値を追う。

4.3 シミュレーション結果 前述の馬の Trot 歩行データを参考にした目標軌跡を用いたシミュレーションを行った。以下に示すのは、そのうちの5完歩分の結果である。1完歩 (左前脚の着地から次の左前脚の着地まで) は約0.69秒である。床反力の鉛直方向成分を図8に示す。図8から対角線上の脚が同期した Trot 歩行が行われたことがわかった。その平均デューティ比は前脚、後脚それぞれ約0.53, 0.51, 全ての脚の平均デューティ比は約0.51である。

1完歩分のスティック線図を図9に示す。上図が左の前後脚、下図が右の前後脚の変化を表している。

Fig. 10 Center of mass of body

Fig. 11 Pitch angle of body

胴体部重心の位置の変化を図10に示す。上の図はロボットの進行方向の重心位置の変化、下の図はロボットの上下方向の重心位置の変化である。上下方向の重心位置は、およそ $\pm 0.011m$ の範囲で変化した。また、進行方向の重心位置の変化はほぼ単調増加した。

胴体部のピッチ角の変化を図11に示す。図11から1完歩でピッチ軸周りの回転運動に2つの大きなピークを持つ歩行を行っていることがわかる。これらの結果から、この歩行は1完歩を1周期(約0.69秒)とするリミットサイクルにはいっており、安定した歩行を行っていることがわかった。

5. トロット歩行実験

シミュレーションで用いたものと同じ目標軌跡と制御方法を用いて4足歩行ロボットPONYでトロット歩行実験を行った。

5.1 実験システム 実験システムを図12に示す。歩行ロボットPONYの制御は外部のPCで行った。アクチュエータ等の電源も外部にあり、センサの出力信号は有線で各インタフェースボードを経て制御用PCに入る。

球節駆動系は図5に示した機構を持っているので、ばねには予め与圧が与えられる。本実験では、ばねを自然状態から 20° 回転させた状態で取り付け与圧を与えた。このため、球節駆動系のばねのねじれ角は 20°

Fig. 12 System of experiment

より小さくなることはない。

5.2 実験結果 馬のトロット歩行を参考にした目標軌跡を与えて4足ロボットPONYでトロット歩行実験を行った。その際、トロット歩行実験中の4足ロボットPONYを側面からビデオ撮影(30f/s)した。その3完歩目の1完歩分の映像の一部を図13に示す。図13の一つの画と画の間隔は4フレーム(2/15秒)である。また、これらの画像それぞれに対応するスティック線図を図14に示す。右脚を実線で、左脚を破線で示した。図13、14の2、4の状態はトロット歩行の特徴である対角線上の脚が同期している。1、5の状態は左右の脚が同期しており、ペース歩行の状態になっている。本実験で用いた目標脚軌道は馬を参考にして作ったもので、ロボット工学的に作成した完全に対称なトロット歩容の目標軌道ではない。そのため、このようにトロット歩行中にペース歩行の状態が現れている。

図15に各脚の支持脚、遊脚の状態を示す。黒丸で示した時期が支持脚となっている状態を表す。図中の1~5の点線は図13、図14中の番号1~5それぞれに対応する時刻を表している。この図から対角線上の脚が、ほぼ同期していることがわかる。ただし、ビデオ画像からもわかったように、部分的に左右の脚が同期するペース歩行が現れている。前脚と後脚の平均デューティ比はそれぞれ約0.53、0.54、全ての脚の平均デューティ比は約0.53であった。

球節駆動系のばねのねじれ角を図16に示す。図中の1~5の点線は図15と同様に、図13、図14中の1~5の番号にそれぞれ対応する時刻を表す。図15、図16の比較からわかるように、各脚の球節駆動系のばねのねじれ角が初期角度 20° より大きくなるのは、その脚が支持脚となっている期間の一部である。これは以下の理由による。本実験で採用した制御方法では支

Fig. 13 Trot gait by PONY; 1step (From video image)

持脚期の全ての期間で球節駆動用モータはサーボロックされる。そのため、脚先端が床反力を受けることで球節に発生するトルクが、ばねが初期角度 20° が与えられていることにより発生しているトルクを超えたときのみにはばねのねじれ角が初期状態より大きくなる。ばねのねじれ角の最大値は約 50° であった。この状態で駆動系のばねにより発生する球節 (fetlock) まわりのトルクは約 $14N \cdot m$ である。

6. まとめと結論

本研究は、馬の肢の骨格および馬の歩行形態を参考に馬型の4足歩行ロボット PONY を開発した。第1報では4足ロボット PONY の開発について報告し、本報では以下のことを報告した。

Fig. 14 Stick diagram; 1step (Experiment)

Fig. 15 State of each leg

1. 歩行システムの矢状面内の運動を計算する歩行シミュレータを開発した。このシミュレータではシステムに次の拘束を付加した。(1) 着地時に脚先端が床面の1点に固定される拘束。(2) 後脚閉リンク機構による拘束。(3) 球節駆動系の機構による拘束。(4) 球節回転角度に制限があることの拘束。これらの拘束は Lagrange の未定係数を用いて系の運動方程式に導入し、歩行システムの状態

Fig. 16 Torsion angles of springs (Experiment)

に応じて切り換えられる。

2. 馬のトロット歩行の肢の軌跡を参考にロボットの目標軌道を作成し、開発した歩行シミュレータを用いて歩行制御方式の検討を行った。その結果、安定な歩行を可能とする一つの歩行制御方式を得た。
3. 製作した4足歩行ロボットPONYでシミュレーションで用いた制御方式と目標軌道を使った5完歩のトロット歩行実験を行い、安定したトロット歩行を実現した。

謝 辞

本研究を進めるにあたりウマの歩行データを提供してくださった日本中央競馬会競走馬総合研究所に感謝いたします。特に甲斐 眞氏から有意義なご意見とご指導を賜りました。感謝いたします。

文 献

- (1) R. B. McGhee, and A. A. Frank, On the stability Properties of Quadruped Creeping Gaits, "Mathematical Biosciences", (1968), Vol.3, pp.331-351
- (2) 古荘 純次, 歩行ロボットの研究展開, "日本ロボット学会誌", Vol.11, No.3, (1993), pp.306-313
- (3) M. H. Raibert, M. Chepponis and H. B. Brown, Jr., Running on Four Legs As Through They were One, "IEEE Journal of Robotics and Automation", (1986), Vol.RA-2, No.2, pp.70-82
- (4) H. Mirura, I. Shinoyama, M. Mitsuishi, and H. Kimura, Dynamical Walk of Quadruped Robot, Cambridge, MA, MIT Press, (1985)
- (5) 木村 浩, 下山 勲, 三浦 宏文, 4足ロボットの力学と制御, "日本機械学会論文集C編", (1995), Vol.55, No.517, pp.2396-2410
- (6) 広瀬 茂男, 米田 完, 4足歩行機械の静動融合歩容とその連続軌道生成, "日本ロボット学会誌", Vol.9, No.3, (1991), pp.267-275
- (7) 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制御, "日本ロボット学会誌", Vol.19, No.3, (2001), pp.380-386
- (8) T. Emura and A. Arakawa, Attitude Control of a Quadruped Robot during Two Leg Supporting, "Proc. 5th Int. Conf. Advanced Robotics", Piza, (1991), pp.711-716
- (9) 榊原 菅, 細田 藤江, 4脚歩行機構のための低衝撃足先軌道, "日本ロボット学会誌", Vol.8, No.6, (1990), pp.662-671
- (10) Y. Takita and K. Seto, The Semi-Dynamical Walking of a Quadruped Robot, "Proc. USA-JAPAN Symp. Flexible Automation", (1988), pp.681-686
- (11) 秋山 浩, 木村 浩, 神経振動子を用いた四足動歩行—ベース, トロットの實現—, "第13回日本ロボット学会学術講演会予稿集", (1995), pp.227-228
- (12) H. Kimura, K. Sakurama and S. Akiyama, Dynamic walking and running of the quadruped using neural oscillator, "Proc. Int. Conf. Intelligent Robots and Systems (IROS'98)", (1998)
- (13) 福岡 泰宏, 木村 浩, 4足ロボットの生物規範型不整地適応動歩行—体性感覚・前庭感覚による調節—, "日本ロボット学会誌", Vol.19, No.4, (2001), pp.510-517
- (14) G. Hawker, and M. Buehler, Quadruped Trotting with Passive Knees-Design, Control, and Experiments, "Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation", (2000), pp.444-449
- (15) D. Papadopoulos, and M. Buehler, Stable Running in a Quadruped Robot with Compliant Legs, "Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation", (2000), pp.3046-3051
- (16) J. Furusho, A. Sano, M. Sakaguchi and E. Koizumi, Realization of Bounce Gait in a Quadruped Robot with Articular-joint-type legs, "Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation", (1995), Vol.1, pp.697-702
- (17) 佐野 明人, 古荘 純次, 尾関 修一郎, 離散時間モデルを用いた歩行周期制御に基づく4足ロボットのペース歩行, "日本ロボット学会誌", Vol.9, No.7, (1991), pp.865-876
- (18) 佐野 明人, 古荘 純次, クロール歩行からペース歩行への静動遷移歩行, "日本機械学会 ロボティクス・メカトロニクス講演会'92 講演論文集", Vol.B, (1992), pp.239-242
- (19) Septimus Sisson, revised by J.D. Grossman, The Anatomy of the Domestic Animals (4th ed.), Modern Asia Edition, (1961)
- (20) 加藤 嘉太郎, 山内 昭二, 改著 家畜比較解剖図説 上巻, 養賢堂, (1995)
- (21) K. Kubo, T. Sakai, H. Sakuraoaka, and K. Ishii, Segmental Body Weight, Volume and Mass Center in Thoroughbred Horses, "Jpn. J. Equine Sci.", (1992), Vol.3, No.2, pp.149-155
- (22) 神谷 敏郎, 骨の動物誌, 東京大学出版会, (1995)