神経振動子を用いた 4 足歩行ロボット「鉄犬 4」による 不整地動的旋回運動の実現*

福岡 泰 宏^{*1}, 木村 浩^{*2}

Realization of Dynamic Turning Motion on Irregular Terrain of a Quadruped Robot “TEKKEN4” with Neural Oscillators

Yasuhiro FUKUOKA^{*3} and Hiroshi KIMURA

^{*3} Department of Intelligent Systems Engineering, Faculty of Engineering, Ibaraki University,
4-12-1 Naka-narusawa-cho, Hitachi-shi, Ibaraki, 316-8511 Japan

We have tried to induce a quadruped robot to walk with medium walking speed on irregular terrain based on biological concepts. We so far reported our experimental results of dynamic walking on terrains of medium degrees of irregularity with quadruped robots Tekken 1 & 2. We design the mechanical system and the neural system by comparing biological concepts. The neural system model consists of a CPG (central pattern generator), stretch reflex center, other reflexes and responses. In this paper, we show the experimental result of turning motion on the irregular terrain as a voluntary movement of newly developed self-contained quadruped robot “Tekken4”. Tekken4 turns dynamically with a small turning radius by inclining the body toward the center of rotation. In addition, Tekken4 autonomously adapts the phase difference between right and left legs by rolling motion feedback to CPGs so called “tonic labyrinthine response”. This response makes Tekken4 be able to walk on the irregular terrain while turning.

Key Words: Mechatronics and Robotics (883), Moving Robot (886), Nonlinear Vibration (847),
Quadruped Robot, Turning, Central Pattern Generator (CPG), Neural Oscillator

1. はじめに

著者らはこれまで、不整地を動的に踏破可能な 4 足ロボット「鉄犬」^[1]の開発を行ってきた。鉄犬は屋内に無作為に設置された高さ 4 cm 以下の段差や、傾斜角 10° 以下の坂の昇降など、不測の不整地における 0.7 m/s 程度での自律適応歩行を可能にしていた。鉄犬は、生物の脳幹・脊髄レベルで行われる、歩行運動生成・制御を参考にしたアルゴリズムを搭載している。具体的に図 1 に、各脚における歩行運動生成・制御メカニズムを示す。まず、生物の脊髄に存在するといわれる運動リズム生成器 Central Pattern Generator (CPG) により脚相情報を生成し、そのリズムに従い、CPG より下位レベルに存在する伸張反射を模倣した PD 制御部によって、各関節トルクを生成する。機構からは CPG、および伸張反射部にセンサ情報がフィードバックされ、運動の調節が自律的に行われる。そして、各脚の CPG を接続することによって、4

足歩行の歩容を生成することが可能となる。このように、鉄犬は脳幹以下の組織を模倣したシステムによって運動生成・制御を行うため、不随意に歩行していると指摘できる。

一方で、旋回は随意的な運動であるため、上位からのどの程度曲がりたいという指令により行われることになる。そこで、オペレータが一つのパラメータを操作するだけで、容易にさまざまな旋回半径での旋回が可能な鉄犬 4 を新たに開発した。鉄犬 4 は、市販のラジコン用送信器による旋回の方角、大きさの調節、およびレーザーレンジセンサにより、壁との距離を一定に保ちながらの壁沿い歩行を可能とする。

Fig. 1 Motion generation on each leg in a biological system

* 原稿受付 2006 年 4 月 10 日.

^{*1} 正員, 茨城大学工学部 (〒316-8511 日立市中成沢町 4-12-1).

^{*2} 正員, 電気通信大学情報システム学研究所 (〒182-8585 調布市調布ヶ丘 1-5-1).

E-mail: fukuoka@mx.ibaraki.ac.jp

旋回可能な4脚ロボットの開発はこれまでも行われてきた。代表的なものとしては、ZMP拘束が保証されるような軌道を用いて旋回を実現する手法がある^{(2)~(5)}。また、ゴキブリのようなピッチ、およびロール軸回りでの胴体揺動はほとんど起こらない昆虫は、水平面内でのCOM (Center of Mass)とCOP (Center of Pressure)の関係により滑らかな旋回運動を行うとの指摘⁽⁶⁾に基づいて、辻田ら⁽⁷⁾は、水平面内において旋回方向に重心をずらすことで左右脚間位相差を生じさせ、非線形振動子による左右脚位相調節を行うことで、滑らかな動的旋回を旋回半径1.6m(4.44**1)程度で実現している。

鉄犬4はさらに、ロール軸回りでの胴体の傾きによる積極的な旋回方向への転倒力を利用することで、より小さい旋回半径での動的旋回を目指す。また、旋回歩行のロバスト性の高さを検証するため、旋回時の段差乗り越えも試みているので、本報で紹介する。最終的に鉄犬4は、旋回半径0.4m(1.33)程度での屋外動歩行も可能にしている。

本研究の特徴はCPG・反射を用いた制御のみにあるのではなく、その制御手法に適合した機構との組合せにより、ソフト・ハードを総括した歩行ロボット「鉄犬4」を提案し、その有効性を実証することにある。これに基づき、2章から鉄犬4の機構、制御手法、および実験結果を紹介していく。

2. 自立4脚ロボット「鉄犬4」

鉄犬4(図2)の基本構成は鉄犬1⁽¹⁾を踏襲している。使用センサ、関節構成は鉄犬1と同様であるが、鉄犬4はデバイスをすべて搭載した自立形にするために、鉄犬1より大形化している。脚長は270(+46)**2

Fig. 2 Self-contained quadruped robot: Tekken4

**1 これは自動車のホイールベースに対する旋回性能にたとえ、(旋回半径/ロボットの前脚間距離)の式で無次元化した値である。これが小さいほど、体の大きさに対して急角度の旋回が可能であるといえる。

**2 ()内の数字は鉄犬1と比較した数値を表す。

mm, 前後脚間距離は300(+70)mm, 左右脚間距離は195(+75.5)mm, 総重量は7.3(+4.2)kgである。一脚は腰(ピッチ), 腰(ヨー), 膝(ピッチ), 足首(ピッチ)の4関節で、各脚は同様の構成となっている。腰(ピッチ), および膝(ピッチ)関節には60(+40)W, 腰(ヨー)関節には27(+21)WのDCモータを、それぞれ適用している。足首(ピッチ)は受動関節である。各関節の減速比は、腰(ピッチ軸)が25(+9.4), 腰(ヨー軸)が25.2(-58.8), 膝(ピッチ軸)が33.3(+14.5)と、平歯車を用いて低減速比にしている。これは関節の摩擦を小さくし、脚にバックドライバビリティを持たせることで、路面や障害物からの衝撃を吸収するためである。また、急旋回時の素早い踏み出し、および衝突時の衝撃緩和のために、脚は足先が軽量な構造になっている。このような機構設計により、短周期のCPG指令による素早い脚駆動を安定に行うことが可能となる。

センサとしては、各関節にエンコーダ、およびピッチ・ロール軸回りの胴体傾斜角度を検出するジャイロと傾斜センサを搭載している。

3. 平地歩行のための神経系の構成

鉄犬4の神経系モデルは、大きく「各脚の位相(支持脚/遊脚)情報を与えるCPG部」と、「トルクを与える伸張反射部(関節のPD制御部)」に分かれる(図1, 3)。なお、センサフィードバックについて本報では、PD制御系でトルクの調節を行うものを「反射」と呼び、CPGの位相の調節を行うものを「反応」と呼ぶ。

本報で紹介する式や表に用いられるパラメータは、すべて実験的に決定されたもので、本報の実験に用いられた値を表1に示す。また、本報の本文やデータ内に示す各関節角を表す記号 $\theta, \psi, \phi, \zeta$ は、それぞれ腰(ピッチ), 腰(ヨー), 膝(ピッチ), 足首(ピッチ)の関節角度を表し、図3に示す初期位置、および方向をもつ。 ψ に関しては、図2右図の状態が $\psi=0$ で、矢印の方向が正となる。body pitch angle, body roll angleはそれぞれ、ピッチ軸、ロール軸回りの胴体傾斜角度を表し、直立姿勢(図2左図)を零点とし、それぞれ前に傾く方向、右に傾く方向を正とする。

鉄犬4は本章の制御を用いて、平地であれば最高1.5m/sまでの動歩行を可能にする。

3.1 CPGによるリズムと歩容の生成 鉄犬4

は、多賀⁽⁸⁾が2足歩行シミュレーションに用いた松岡⁽⁹⁾の神経振動子[式(1)]を、CPGとして適用している。

Fig. 3 Control diagram for Tekken4. PD-control at the hip yaw, knee pitch and ankle pitch joints are eliminated in this figure. LF, LH, RF and RH mean the left fore, left hind, right fore and right hind leg, respectively

$$\begin{aligned} \tau \dot{u}_{\{e,f\}i} &= -u_{\{e,f\}i} + w_{fe} y_{\{f,e\}i} - \beta v_{\{e,f\}i} \\ &+ u_0 + \text{Feed}_{\{e,f\}i} + \sum_{j=1}^n w_{ij} y_{\{e,f\}j} \\ y_{\{e,f\}i} &= \max(u_{\{e,f\}i}, 0) \\ \tau' \dot{v}_{\{e,f\}i} &= -v_{\{e,f\}i} + y_{\{e,f\}i} \end{aligned} \quad (1)$$

ここで、添字 e は伸筋ニューロン、 f は屈筋ニューロン、 i は i 番めの脚を表し、それぞれの脚において左前:1, 左後:2, 右前:3, 右後:4となる。変数 $u_{\{e,f\}i}$, $v_{\{e,f\}i}$ はニューロン内の状態、 $y_{\{e,f\}i}$ はニューロンの出力、 $\text{Feed}_{\{e,f\}i}$ はセンサ入力に関する項であり、定数 u_0 は上位からの駆動入力、 β はニューロンの疲労係数、 τ , τ' は $u_{\{e,f\}i}$, $v_{\{e,f\}i}$ の時定数、 w_{fe} は拮抗ニューロン間の結合係数である。 w_{ij} は脚 i の神経振動子のニューロン出力 $y_{\{e,f\}i}$ が、脚 j の神経振動子のニューロンに入力されるときに結合係数であり、これにより各脚の神経振動子を結合して、神経振動子ネットワークを構成する。この結合によって各脚の神経振動子は、相互に引き込まれ歩容を生成する。

神経振動子の出力は、式(1)の $y_{\{e,f\}i}$ を用いて次式のように表される。以降、単独の脚について表す場合は添字 i を省略する。

Table 1 Values of the parameters used in experiments with Tekken4

parameters	value	parameters	value
u_0	1.0	k_{tsr} [1/rad]	3.0
τ	0.04	G_1 [Nm/rad]	20.0
τ'	0.6	G_2 [Nms/rad]	2.5
β	3.0	G_3 [Nm/rad]	0.3
w_{fe}	-2.0	G_4 [Nms/rad]	0
$w_{\{13,31,24,42\}}$	-2.0	G_5 [Nm/rad]	3.5
$w_{\{12,34\}}$	0	G_6 [Nm/rad]	7.5
$w_{\{21,43\}}$	-0.57	G_7 [Nm/rad]	5.5
θ_0 [rad]	-1.05	G_8 [Nm/rad]	10.0

Fig. 4 Virtual spring-damper system

$$y = -y_e + y_f \quad (2)$$

y が正のときは屈筋ニューロンの活性を、負のときは伸筋ニューロンの活性をそれぞれ意味する。

式(1)中、神経振動子へのセンサ入力 $\text{Feed}_{\{e,f\}i}$ としては、多賀が2足歩行モデルのシミュレーションに用いた関節角フィードバックに、胴体傾斜角フィードバックを取り入れた式(3)~(6)を適用する。本報では、式(3)を前庭脊髄反応(vestibulospinal response)、式(4)、(5)を伸張反応(tonic stretch response)と呼ぶ。

$$\theta_{vsr} = \theta - (\text{body pitch angle}) \quad (3)$$

$$\text{Feed}_{e \cdot tsr \cdot vsr} = k_{tsr} (\theta_{vsr} - \theta_0) \quad (4)$$

$$\text{Feed}_{f \cdot tsr \cdot vsr} = -\text{Feed}_{e \cdot tsr \cdot vsr} \quad (5)$$

$$\text{Feed}_{\{e,f\}} = \text{Feed}_{\{e,f\} \cdot tsr \cdot vsr} \quad (6)$$

ここで、 θ_0 は立脚静止時の θ の値、 k_{tsr} はゲインである。このフィードバックにより、神経振動子はピッチ軸回りにおける腰関節の周期的な運動に引き込まれる。

3.2 仮想ばね・ダンパ系によるPD制御 脚の基本動作として、遊脚振り上げ(A)、遊脚振り出し(B)、支持脚復帰(C)の各運動を生成するために、歩行中の各関節は図4に破線で示されるような三つの状態(A, B, C)の目標角度に、順次PD制御される。各

Table 2 Desired value of the joint angles and P-gains at the joints used by the PD-controller in each state of the virtual spring-damper system (Fig. 4)

P control		
angle in state	desired value[rad]	P-gain
θ in A	$1.2\theta_{C \rightarrow A}$	G_1
θ in B	-0.17	G_2v+G_3
θ in C	$-0.87+$ body pitch angle	$-G_4v+G_5$
ϕ in A & B	ϕ_{sw}^*	G_6
ϕ in C	0.7	G_7
ψ in all states	0	G_8

状態への切換え条件は以下である。

A→B: 腰関節が状態 A の目標角度に達したとき

B→C: 神経振動子の伸筋ニューロンが活性 ($y \leq 0$) になったとき

C→A: 神経振動子の屈筋ニューロンが活性 ($y > 0$) になったとき

それぞれの状態での各関節の目標角度(ばねの中立点)と P ゲイン(ばねの剛性)を, 表 2 に表す。 $\theta_{C \rightarrow A}$ は $y > 0$ になった瞬間の θ である。 v は鉄犬 4 の歩行速度を表し, 支持脚時の腰関節角速度 $\dot{\theta}_{usr}$ から算出される。 ϕ_{sw}^* では, 腰関節から足先までの高さが一定の 155 mm になるような, 膝関節 ϕ の目標値が on-line で計算される。 D 制御に関してはすべて, 目標角速度は 0 rad/s, 角速度ゲインは 0.03 Nm・s/rad と設定する。 支持脚期の各関節の PD ゲインは小さく, また関節の摩擦も小さいため, 鉄犬 4 は非常に柔軟な関節を持つ。

4. 旋回運動の実現

4.1 旋回動作の導入 鉄犬 4 の旋回は旋回の方向および大きさを, ラジコン用の送信器により与えることで行う。 図 5 に上から見た鉄犬 4 が左に旋回するようすを表す。 鉄犬 4 は基本的には対角の脚が同位相, 隣合う脚が逆位相となるトロット歩容で歩行する。 そのうち, 図 5(a) は右前, および左後脚が接地しているとき, (b) は左前, および右後脚が接地しているときの旋回の様子を表している。 図 5(a) のとき, 右前脚の腰(ヨ一)関節を外側(+)に回すことで, A の脚を支点として胴体は左に旋回する。 一方, 図 5(b) のときは左前脚の腰(ヨ一)関節を内側(−)に回すことで, 同じく A の脚を支点として胴体は左に旋回する。

*** 足首関節は受動関節となっており, 図 3 のように足が地面に接触したときのばねの圧縮長をエンコードにより検出することで, 接触を判別する。

Fig. 5 Turning left by using yaw pitch joint

右に旋回する場合は逆の動作を行う。 具体的には, 表 2 に表す腰(ヨ一)関節の目標角度を, 支持脚 ($\xi > 0.65$)*** のときのみ次式 (7) に変更する。 RCinput (−500~500) は送信器から与えられ, 旋回方向は RCinput > 0 のとき左, RCinput < 0 のとき右であり, 旋回の大きさは |RCinput| で表される。 8.73×10^{-4} は実験的に決定されたゲインである。

$$\psi_{st}^* = \delta(\text{leg}) \text{RCinput} \times 8.73 \times 10^{-4} \quad (\xi > 0.65) \quad \dots\dots\dots (7)$$

$$\delta(\text{leg}) = \begin{cases} 1, & \text{if leg is a right foreleg} \\ -1, & \text{if leg is a left foreleg} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$$

鉄犬 4 は, 図 5 のような水平面内での旋回動作だけではなく, 旋回方向への転倒力を利用した小旋回半径での旋回が可能である。 例えば図 5(a) において, 左図の通常歩行時には, 支持脚接地点 A, B を結ぶほぼ線分 AB 上に重心が存在する*** が, 右図の旋回動作時には, 重心は線分 AB よりも左に存在する。これが左方向への転倒力となって, 左に倒れながら小旋回半径で旋回することができる。さらに, 低減速比, 低ゲインの柔軟な腰(ヨ一)関節を持つことが, より大きな転倒力を促す。例えば, 左旋回するとき, 柔軟な左支持脚の腰(ヨ一)関節は自然な重力負荷を受けて, 負方向, すなわち体の内側に大きく曲がり, ロール軸回りで胴体がより大きく左へ傾いて急旋回が可能になる。

4.2 旋回中の脚位相調節 4.1 節のように, 旋回動作は送信器による操作で随意的に行うが, 左右脚の運動が不均衡になる旋回歩行中に, 安定かつリズムカルに旋回するためには, 左右脚の位相差が適切に調節されなければならない。そのため, 上述した旋回方向への転倒動作をロール軸回りの胴体傾斜角として検出

*** 実際の重心は図よりも後方にあるが, わかりやすく説明するために図の位置にしている。

し、これを各脚の神経振動子にフィードバックすることにする。具体的には、生物の緊張性迷路反応(tonic labyrinthine response)**5の定義に基づき、次式(8)を導入する。

$$\begin{aligned} \text{Feed}_{e, \text{ttrs}} &= \delta(\text{leg}) k_{\text{ttrs}} \times (\text{body roll angle}) \\ \text{Feed}_{f, \text{ttrs}} &= -\text{Feed}_{e, \text{ttrs}} \dots\dots\dots (8) \\ \delta(\text{leg}) &= \begin{cases} 1, & \text{if leg is a right leg} \\ -1, & \text{otherwise} \end{cases} \end{aligned}$$

body roll angle は、ロール軸回りの胴体傾斜角である(図3)。式(8)は、傾いた側の脚の伸筋ニューロンを活性化させて支持脚期を長くし、逆に、対脚の屈筋ニューロンを活性化させて遊脚期を長くする効果を持つ。これは、個々にピッチ運動している左右脚間の位相差を、ロール運動により調節していると考えられ、結果的にピッチ運動とロール運動を同期させる効果が得られる。それによって、旋回中においても、左右脚の位相差が適切に調節されると考えられる。以後、本報では式(8)をロール運動・緊張性迷路反応と呼ぶ。

ロール運動・緊張性迷路反応を追加した式(9)を、鉄犬4の反応として神経振動子の式(1)に代入する。

$$\text{Feed}_{(e,f)} = \text{Feed}_{(e,f) \cdot \text{ttr} \cdot \text{usr}} + \text{Feed}_{(e,f) \cdot \text{ttrs}} \dots\dots\dots (9)$$

5. ロール運動・緊張性迷路反応を用いた 旋回段差越え歩行実験による 旋回性能の検証

ここでは、鉄犬4の旋回歩行におけるロール運動・

Fig. 6 An experiment of walking on the flat terrain while turning left without tonic labyrinthine response ($k_{\text{ttrs}}=0.0$). Tekken4 turned about 3/5 circle between 0 to 5 s

**5 頭部が左右および前後に傾いたとき、傾いた側の肢が伸展し、反対側の肢が屈曲する反応⁽¹⁰⁾。

緊張性迷路反応の効果を検証する。送信器から与える RCinput [式(7)] は、480 で常時固定しておく、したがって旋回方向は左となり、旋回軌跡は円を描く。

まず、式(8)において $k_{\text{ttrs}}=0.0$ とし、ロール運動・緊張性迷路反応を適用しないようにして、平地で旋回を行ったときの実験結果を図6に表す。歩行においては左右脚は逆位相にならないといけないが、A、Bにおいて瞬間的に両前脚とも遊脚になっており、Cにおいては約0.2sもの間両脚が遊脚になったため、その後転倒している($\text{WSM}<0^{**6}$)。また、4・1節の旋回動作によって生じる旋回方向への転倒力(図5)のため、左に傾きながら旋回するはずであるが、脚のピッチ運動の指令を与える神経振動子と胴体ロール運動の周期を合わせられないために、Dのように大きく右に傾くことがある。結果的に急角度での旋回は難しく、旋回半径は0.8m程度であり、なおかつリズムが大きく乱れた5s後に転倒しているように、平地ですら安定性に欠ける。

次に、式(8)において $k_{\text{ttrs}}=1.95$ として、ロール運動・緊張性迷路反応を適用して旋回を行ったときの実験結果を、図7に表す。なお、ここではさらに大きな外乱を受けたときの旋回のロバスト性を検証するために、3s付近において高さ2cmの段差乗り越えを行っている[図8(a)]。まず、段差乗り越え前の0~3s

Fig. 7 An experiment of walking on the flat terrain and over a step 2 cm while turning with tonic labyrinthine response ($k_{\text{ttrs}}=1.95$). Tekken4 turned about 2 circles between 0 to 6 s

**6 遊脚・支持脚にかかわらず、重心の鉛直投影点から各足先の鉛直投影点を頂点とする多角形の、辺までの最短距離を広域安定余裕 WSM (Wide Stability Margin) とし、安定判別の指標とする⁽¹⁾。なお、実験データ中の WSM は胴体幅 $w=195$ mm によって正規化している。

(a) Over a step 2 cm in height (b) In outdoor environment

Fig. 8 Photos of turning of Tekken4

Fig. 9 A snapshot of Tekken4 in Aichi-expo

の平地旋回時においてとを見ると、両前脚は常に逆位相で、ともに遊脚になる瞬間もなく、かつ図6と比較してはるかにリズムカルに運動していることがわかる。その結果、胴体が左に傾斜した状態を維持しながら ($\text{body roll angle} < 0$)、安定して旋回できている ($\text{WSM} > 0$) ことがわかる。そして、段差を乗り越えた後はしばらくとに乱れが見られるが(E)、伸張反応、前庭脊髄反応、およびロール運動・緊張性迷路反応により、神経振動子がピッチ運動とロール運動を同期させ、神経振動子の自己安定化能力によって、安定した歩行に再起していることがわかる(F)。結果的に、図7の実験における旋回半径は0.4 m (1.33)程度と、ロール運動・緊張性迷路反応を適用しない場合に比べて急旋回が可能なおうえ、段差に乗り上げるような大きな外乱が加わっても安定であるという、高いロバスト性をも有することがわかった。

6. 終わりに

本報では、生物の神経系を参考にして、CPG(神経振動子)と反射・反応を用いた脳幹や脊髄レベルで行われる不随意な歩行運動生成・制御手法に、旋回のための簡単な随意操作を加えるという非常にシンプルなアルゴリズムを、それに適した機構を持つ4足ロボット「鉄犬4」に搭載し、動的な平地旋回や段差乗り越えを実現した。そこでは、旋回方向への転倒力を利用することで、0.4 m (1.33)程度の小旋回半径での旋回

が歩行速度0.7 m/s程度で可能になっている。また、鉄犬4は屋外舗装路[図8(b)]や、小石や砂などが散乱する自然環境においても同程度の旋回半径での歩行を実現し、旋回運動のロバスト性の高さを実証している。

鉄犬4は、歩行周期を変える効果がある神経振動子の時定数 τ や、伸張反応のゲイン k_{tsr} を変更して歩行周期を短くすると、一支持脚期間が短くなるため、旋回方向への効果的な転倒が防げられてしまい、旋回半径が大きくなる。また、鉄犬4にはZMPを用いた手法のように、環境に合わせた旋回のための全身の軌道を一意に与えるわけではないので、どの程度の旋回半径で旋回するかは歩行環境に依存し、各脚への重力負荷のかかり方や路面の摩擦などによって異なる。したがって将来的には、視覚などを用いた調節が必要となると考えられる。本研究では、試験的にレーザレンジセンサを用いて壁から鉄犬4までの距離を検出し、一定間隔を保ちながら壁沿いに歩行する簡単なナビゲーションを実現している⁽¹¹⁾(図9)。

鉄犬4は、新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の研究助成を受けて開発された。鉄犬4の製作の一部は(株)東京精機、(有)ロボトピア、(有)図工、(株)相信、(株)応用計測研究所に委託された。ここに関係各位への感謝の意を表す。

文 献

- (1) Fukuoka, Y. et al., Adaptive Dynamic Walking of a Quadruped Robot on Irregular Terrain based on Biological Concepts, *International Journal of Robotics Research*, Vol. 22, No. 3-4 (2003), pp. 187-202.
- (2) Hirose, S. et al., The Standard Circular Gait of the Quadruped Walking Vehicle (in Japanese), *Journal of the Robotics Society of Japan*, Vol. 2, No. 6 (1984), pp. 545-556.
- (3) Kimura, H. et al., Dynamics and Control of the Quadruped (in Japanese), *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, Vol. 55, No. 517 (1989), pp. 2396-2403.
- (4) Yoneda, K. et al., Intermittent Trot Gait of a Quadruped walking Machine -Dynamic Stability Control of an Omnidirectional Walk- (in Japanese), *Journal of the Robotics Society of Japan*, Vol. 14, No. 6 (1999), pp. 881-886.
- (5) Tomiyama, T. et al., All-directional Walking of a Quadruped Robot based on Crawl and Rotation Gaits (in Japanese), *Journal of the Robotics Society of Japan*, Vol. 20, No. 3 (2002), pp. 85-92.
- (6) Schmitt, J. et al., Dynamics and stability of legged locomotion in the horizontal plane: a test case using insects, *Biological Cybernetics*, Vol. 86 (2002), pp. 343-353.
- (7) Tsujita, K. et al., Dynamic turning control of a quadruped locomotion robot using oscillators, *Advanced Robotics*, Vol. 19, No. 10 (2005), pp. 1115-1133.

- (8) Taga, G. et al., Self-organized control of bipedal locomotion by neural oscillators, *Biological Cybernetics*, Vol. 65 (1991), pp. 147-159.
 - (9) Matsuoka, K., Mechanisms of Frequency and Pattern Control in the Neural Rhythm Generators, *Biological Cybernetics*, Vol. 56 (1987), pp. 345-353.
 - (10) *Nanzando medical book*, (in Japanese) ver. 18, (1998), p. 500, Nanzando.
 - (11) Kimura, H. et al., Mechanical Design of a Quadruped "Tekken 3 & 4" and Navigation System Using Laser Range Sensor, *Proceeding of International Symposium on Robotics*, TU 3 H 6 (2005-11), Tokyo.
-