

脚の加負荷・除負荷に基づく位相調節を用いた4脚動歩行における姿勢とリズム運動制御の統合

京都工芸繊維大学 モフロア クリストフ, ○西川 朋宏, 木村 浩

Posture and Rhythmic Motion Controls in a Quadruped using Phase Modulations based on Unloading

Christophe MAUFROY, ○ Tomohiro NISHIKAWA and Hiroshi KIMURA ,
Kyoto Institute of Technology

Abstract: In this study, we intend to show the basis of a general legged locomotion controller with the ability to integrate both posture and rhythmic motion controls and shift continuously from one control method to the other according to the walking speed. For the purpose, we use the method of the phase modulations based on leg loading/unloading. In this paper, we report the result of experiments using a newly constructed quadruped robot “Kotetsu” in order to verify the results of simulations. Details of trajectory generation and movies can be seen at: <http://robotics.mech.kit.ac.jp/kotetsu>

1 はじめに

リミットサイクル規範の手法に基づき, Central Pattern Generator (CPG) [1] と反射から成る神経系を用いた鉄犬で不整地における4脚動歩行は実現された[2]. しかし, CPG レベルでの位相調節と反射とがそれぞれ安定性にどれほど貢献しているのかは明確ではなかった. さらに, 周期の増加が胴体のロール運動を大きくし, 前頭面の姿勢を不安定にするため長い歩行周期での動歩行は実現されていない.

通常, 4足歩行動物は長くて細い胴体を持っており, また対側の脚が同時に遊脚になることはない. そのため, 矢状面での姿勢は容易に安定化され, 前頭面の姿勢制御, つまり胴体の横(ロール)方向の運動の制御が主な問題となる[3]. ロール運動の安定化は歩行サイクル中の脚の支持脚相と遊脚相の期間をそれぞれ調節する位相調節によって達成される.

我々の先行研究[4]では, 脚相の遷移に関して脚の加負荷・除負荷情報を用いた3Dシミュレーションを行うことで以下のことを示した.

- 矢状面における各脚のリズム運動は生成された. ローカルな脚の加負荷・除負荷情報は現在の脚相(遊脚なのか支持脚なのか)と胴体の全体的な姿勢の両方を反映するため, 我々の手法は矢状面における脚のリズム運動と前頭面における胴体の姿勢制御を陽な脚間協調機構なしに, 同時に行うことができる.
- 提案した手法は横方向の摂動に対して陽な脚間協調機構なしでもある程度の抵抗力を有しているが, ロール運動の振幅を減少させる摂動に対しては同足間での上行性協調機構が必要である. 前庭情報を用いた踏み出し反射なしに, 我々の制御システムは長い周期や不整地での低速の動歩行が可能である. これはこれまでの研究[2]では実現されていない.
- 脚間協調を含むリズム運動制御や姿勢制御との統合は重力場での胴体の力学と脚式歩行の特徴を利用することで達成される.

本論文では, シミュレーションの結果と比較するために新しく作成した4脚ロボット”小鉄”を用いた初期実験の結果を報告する.

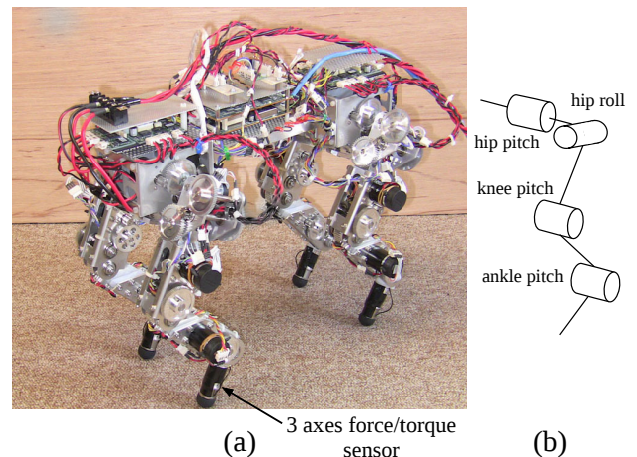


Figure 1: Kotetsu. Photo and joint configuration. Kotetsu is not self-contained, and it is tethered by power and LAN cables. But the motion of Kotetsu is very little disturbed by cables.

2 4脚ロボット”小鉄”

4脚ロボット”小鉄”を Fig.1 に示す. 各脚はそれぞれ, 大腿, 脛, そして足の3つの部分によって構成されており, ピッチ軸方向に回転する腰, 膝, 足首関節を持っている. それぞれの足の先端には法線方向床反力 f_n を計測するために力センサが取り付けられている. センサ依存による適応的な制御を実現するために, 機械システムは慣性モーメントが小さい, 低摩擦, 高いバックドライバビリティをもつなど, 優れた力学特性をもつように設計されている.

先行研究におけるシミュレーションモデルにおいては, 前頭面内の姿勢制御において脚の加負荷・除負荷に基づく位相調節の効果を調べるために脚にロール軸回りの関節を持たせなかった. しかし, 今後の発展のために小鉄は各脚にロール関節を有している. そのため, 本論文においてはシミュレーションの結果と比較できるよう, 実験時には全てのロール関節を機械的に固定している.

歩容は脚のピッチ運動中の脚間位相差 ($\gamma \in [0, 1]$) で特

徴づけられる歩行パターンである．低・中速歩行域において，イヌやネコのような中型の哺乳類は主にウォークを用いる． γ^{cntr} と γ^{ipsi} はそれぞれ対側，同側間の脚間位相差を表し，ウォークは $\gamma^{cntr} = 0.50$, $\gamma^{ipsi} \simeq 0.25$ で特徴づけられる．本研究では小鉄を用いて，ウォークを生成するための制御手法について考える．

3 脚の加負荷・除負荷情報に基づく位相調節

上付記号 hat: ^, bar: ¯, tilde: ~ はそれぞれノミナルな(名目上の)値，実際の値(センサによる計測値)，目標値を表す．

3.1 単一脚コントローラ

3.1.1 概要

我々の制御システムはCPGモデルの構成法に基づいており，脚制御器(*leg controller*, LC)といわれる制御器が各脚の運動を司る．その内部組織をFig.2で表し，数学的記述はeq.(1)~(13)である．各LCは2つの位相，遊脚相(*swing*, *sw*)と支持脚相(*stance*, *st*)を持っており，それらの間での遷移はセンサによる支持脚の負荷に関する情報，脚負荷(*leg loading*)を用いて形作られる．

各LCは，一定の振幅と可変な位相： ϕ^i を持った簡単な振動子に関連付けられる．ただし， i は脚番号である[5]，[6]．振動子を含むこのような表現は，目標軌道生成の過程と脚間位相関係の定義を簡潔にするために導入された．しかしながら，脚相遷移はセンサフィードバックを用いて形作られるので，センサフィードバックは歩行リズムに大きな影響を与える．

脚先の軌道は，LCの現在の位相： ϕ^i に基づいて生成される．そのためにいくつかの脚先位置 r が定義される必要がある．遊脚相から支持脚相へ遷移することが想定される時の脚先位置は $\hat{r}_{AEP}$ (AEP: anterior extreme position)，実際に遷移が起きた位置は r_{TD} (TD: touchdown)で表される．同様に，支持脚相から遊脚相へ遷移することが想定されるとき脚先位置は $\hat{r}_{PEP}$ (PEP: posterior extreme position)，実際に遷移が起きた位置は r_{LO} (LO: liftoff)で表される．

3.1.2 位相力学

脚相遷移が起きたとき，位相 ϕ は遊脚相開始時にはeq.(1)の $\hat{\phi}_{PEP}$ に，支持脚相開始時にはeq.(7)の $\hat{\phi}_{AEP}$ に，それぞれリセットされる．

その後，位相はeq.(2)とeq.(8)に示される最大値に達するまで， $\hat{\omega}$ の一定割合で増加する．

$\hat{\phi}_{AEP}$ ， $\hat{\phi}_{PEP}$ ， $\hat{\omega}$ は，ノミナルな遊脚期間 $\hat{T}_{sw}$ とノミナルなデューティ比 $\hat{\beta}$ からeq.(11)とeq.(12)を用いて計算される．

3.1.3 脚先の軌道生成と関節PD制御

各脚のステップサイクルで脚先の目標軌道は，測定された初期位置(r_{LO} または r_{TD})とノミナルな最終位置($\hat{r}_{AEP}$ または $\hat{r}_{PEP}$)の間で，遷移時の速度の連続性を保証しながら計算される．胴体の腰関節部に固定された2次元座標系で軌道の x と y 方向のノミナルな速度成分は位相 ϕ を用いて計算・パラメータ化され，脚先のノミナルな位置はそれら速度の時間積分によって得られる．脚先のノミナルな位置と速度に基づき，目標関節角と角速度が，逆運動学を用いて計算される．関節トルクはPD制御則を用いて生成される．

3.1.4 遷移条件

各LCでの遊脚相と支持脚相の間の遷移は，脚先の力センサによって測定される垂直床反力 f_n (脚負荷)と位相 ϕ を用いた条件式: eq.(3)~(6)により形作られる．

遊脚相から支持脚相への遷移は，脚先の地面への接触が検出されること，すなわち脚負荷が0より大きくなることにより発生する(eq.(3))．

一方，支持脚相から遊脚相への遷移は，脚負荷がある閾値を越えている間は発生しない(eq.(5)) [7]．ノミナルな脚負荷の閾値 $\hat{\chi}$ は，機械モデルの全重量の4分の1よりもわずかに小さい値に設定される．

位相： ϕ に基づく条件: eq.(4)，(6)は，ある脚相からもう一方の脚相への望まない早期の遷移を防ぐ役割を果たす．

例えば，eq.(4)はLCの脚相が遊脚相へ遷移したのち実際の離地が発生して f_n が0になるまでの十分な時間を保証し，eq.(6)はLCの脚相が支持脚相へ遷移したのち f_n が十分に増加する時間を保証する．

3.2 上行性協調機構

小鉄を用いた実験において時々，前脚が同側の後脚よりも先に支持脚相から遊脚相へ遷移されるのが確認された．このような相遷移の不規則性の原因に関して，以下の2点が考えられる．

1. 小鉄でのPゲインの調整範囲はシミュレーションにおけるそれよりも狭いため，結果として生じた歩容がペースに移った．
2. 小鉄の胴体の重心が中心よりもわずかに後方にあるため，前脚の脚の加負荷が同側の後脚のものよりも小さくなった．

この問題を解決するために，我々はPゲインや胴体の重心位置を調整するのではなくeq.(14)によって表される上行性協調機構(Ascending Coordination Mechanism: ACM)を用いた．このACMは前脚の支持脚相から遊脚相への遷移を同側の後脚が遊脚になるまで抑制する．

$$\chi_{LO}^{sF} = \begin{cases} \hat{\chi}_{LO} & \text{if } \phi^{sH} \in [\phi_{acm}; \hat{\phi}_{AEP}] \\ -5(N) & \text{otherwise} \end{cases} \quad (14)$$

ただし， ϕ_{acm} は調整閾値で今回は $0.55\hat{\phi}_{AEP}$ にセットした．これは通常の状態では遷移が起こる ϕ^{sH} の半分の値よりもわずかに大きい値である．-5という値は重要ではなく負の値ならば構わない．

4 位相調整に基づく歩容生成と姿勢制御

4.1 脚負荷移動メカニズム

各脚のピッチ運動の結果，歩行中に脚負荷は支持脚間を移動する．そのメカニズムには主に以下の2種類がある．

- 「脚負荷の前方向への移動」は，支持脚接地点に対する胴体の前進運動に関係づけられる．このメカニズムは，後方の支持脚から前方の支持脚への脚負荷の移動をもたらす．
- 「脚負荷の横方向への移動」は，支持脚接地点に対する胴体の横方向運動に関係づけられる．

脚負荷の前方向への移動は，運動が矢状面内に拘束されている時でも現れる．一方，脚負荷の横方向への移動は，矢状面内の脚運動と前頭面内の胴体運動の間に相互作用があるとき，すなわち，3次元歩行にのみ現れる．従って，3

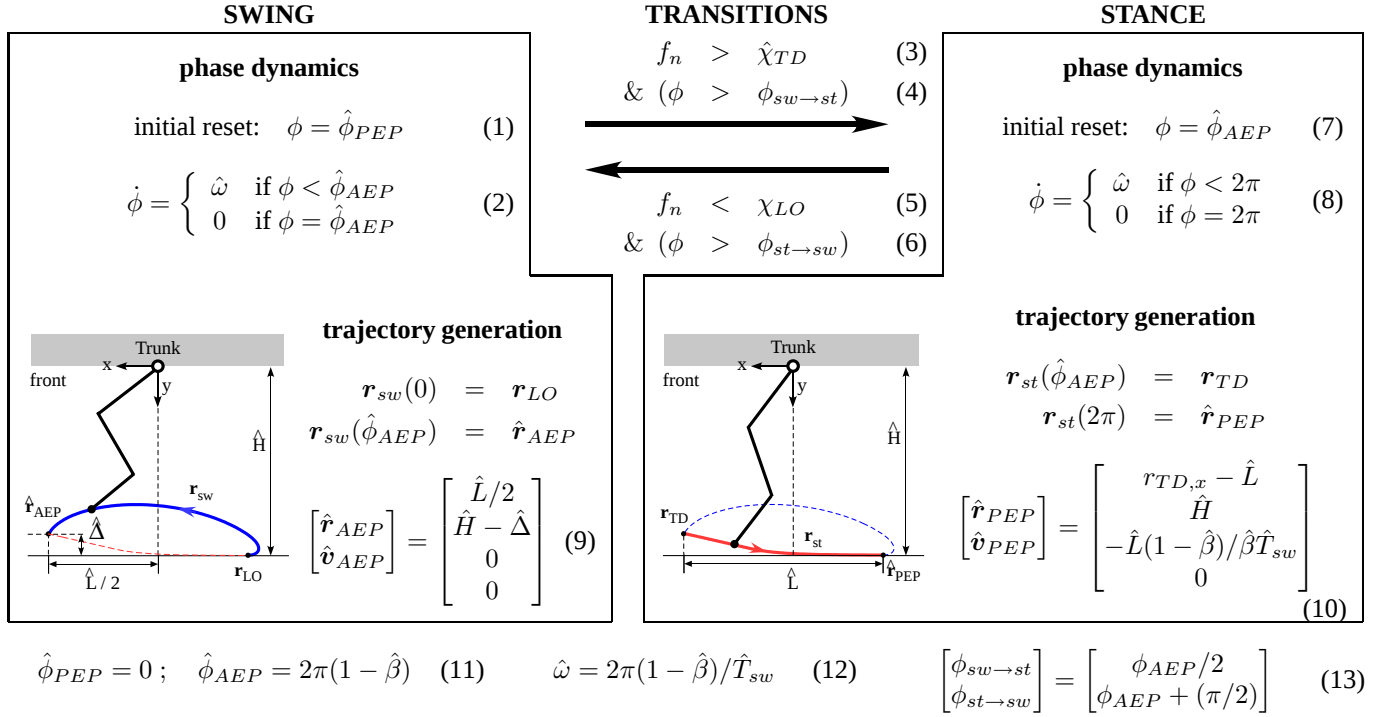


Figure 2: Leg Controller structure. The foot trajectories are expressed in the Cartesian coordinate system fixed to the trunk and centered at the hip joint ($*_x$ and $*_y$ refer respectively to the x and y coordinates, while $\mathbf{r}$ and $\mathbf{v}$ are the position and the speed vectors).

次元歩行において各脚の負荷は、各脚の矢状面内運動（歩容）と胴体の前頭面内運動（姿勢）を関係づける重要な情報である。

ここで、各脚制御器（LC）は脚相遷移条件に脚の加負荷と除負荷を用いていること、そして、ここで述べたように歩行中には前方向と横方向の脚負荷の移動が発生することにより、Section 4.2 で述べるように LC 間の直接の結合無しでも身体の運動を通して LC 間の協調が発生し、結果として安定な歩容が生成される。

4.2 前頭面内の姿勢安定化

脚の加負荷・除負荷情報に基づく位相調整による姿勢安定化のメカニズムを Fig. 3 に示す。最初にモデルに右から左方向に摂動が与えられた場合について考えると、胴体のロール運動は非対称になり、その結果、歩行中にモデルは左方向に傾く。言い替えると、摂動が与えられたとき、1 周期の間での胴体ロール角 (θ_{roll}) の平均値は負になる ($\langle \theta_{roll} \rangle_k < 0$)。平均値 $\langle * \rangle_k$ の定義は [4] で与えられている。ロール運動の非対称性は脚負荷の非対称性を生じさせ、左脚の負荷の平均値 $\langle f_n^{L*} \rangle_k$ は右脚のそれ $\langle f_n^{R*} \rangle_k$ よりも大きくなる。 f_n は支持脚相から遊脚相への遷移の調整に使われるので、左脚での $\langle f_n \rangle_k$ の増加は支持脚相の延長を、右脚での $\langle f_n \rangle_k$ の減少は支持脚相の短縮をもたらす。結果として、左脚の実際のデューティ比は増加し右脚のそれは減少する ($\beta_k^{L*} > \beta_k^{R*}$) ので、 $\langle f_n \rangle_k$ の非対称はさらに増加していく。よって、デューティ比の自動調節を通して、ロール運動の非対称をキャンセルするような重力によるモーメントが $\langle \theta_{roll} \rangle_{k+1}$ を 0 に戻すように働き、前頭面内での姿勢安定化に貢献する。もちろん、反対方向に胴体のロール運動の非対称性を起こす摂動に対しても同じ論議が成り立つ。

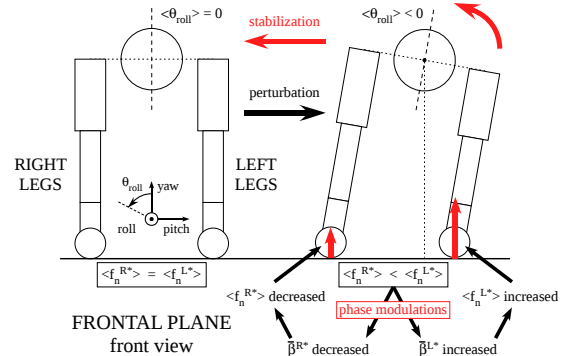


Figure 3: Stabilization mechanism provided by the phase modulations based on leg unloading information.

5 実験結果

Section 3 で示した制御手法を用いることで、我々は小鉄での安定な動歩行を実現した。

その実験結果を Fig. 4 に示す。この結果からウォーク歩容が生成されていること、また 2 脚支持期が存在することから動歩行であることが確認できる。

この図は歩行周期 $\bar{T} \approx 0.64s$ 、デューティ比 $\bar{\beta} \approx 0.71$ 、同側間位相差 $\gamma^{ipsi} \approx 0.21$ 、歩行速度 $0.2m/s$ の歩行パターンを表している。これらの値は今回の実験で用いたノミナルなパラメータ: $\hat{\beta} = 0.75$, $\hat{T}_{sw} = 0.25s$ (結果として $\hat{T} = 1.0s$) で考えた時に予想される値とまったく異なる値である。このことは運動が位相調節によって強く影響を受けていることを示している。

Fig. 4 より全ての脚において遊脚相から支持脚相への遷移は脚負荷: f_n が $\hat{\chi}_{TD}$ よりも大きくなった時に起こっていることがわかる。同様に後脚においては支持脚相から遊脚相への遷移が f_n が $\hat{\chi}_{LO}$ よりも小さくなった時に起こる。一方、前脚における支持脚相から遊脚相への遷移

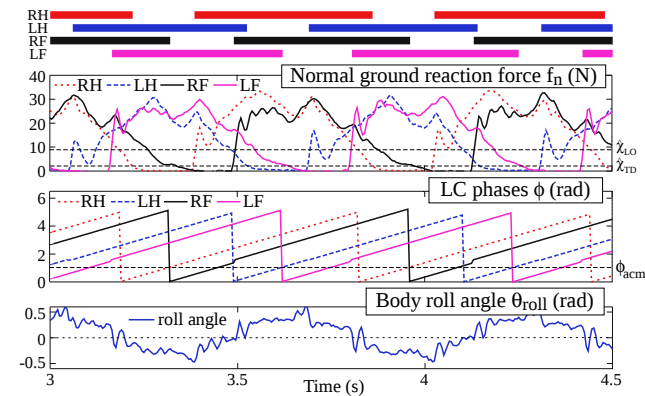
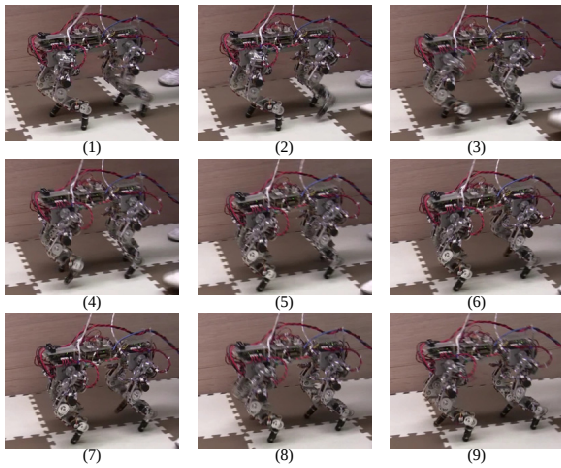


Figure 4: Result of the experiment. The top figure shows snapshots at every 65msec. The middle figure shows the gait (solid lines mean the stance phase), leg loading, LC phase and rolling motion (measured by an accelerometer).

はACM(eq.(14))によって f_n が $\hat{\chi}_{LO}$ よりも小さくなった後も抑制され、同側後脚のLC位相が ϕ_{acm} よりも大きくなった時に起こる。後脚の支持脚相から遊脚相への実際の遷移はLCの支持脚相から遊脚相への遷移のおよそ36ms後に起こっており、 f_n は十分に小さくなっている。しかし、ACMによる抑制の結果として f_n は十分に小さくなっているため、前脚の支持脚相から遊脚相への実際の遷移はすぐに起こっている。

胴体のロール角の幅はおよそ ± 0.5 rad (28.6 deg)である。これは歩行周期が0.64sと比較的長いためロール運動が小さいものではないことを意味している。通常、このような小さいロール運動は動歩行を不安定にする。しかし、提案した制御手法はSection 3に示した脚の除負荷に基づき位相を調整することでロール運動を安定化することが可能なため、小鉄は安定に歩行を続けることができる。

6 考察

6.1 パラメータ調整への依存性

センサフィードバックに強く依存する手法の主な欠点は、システムの性能が身体の機械的特性と環境との相互作用により依存することである。これは適切なパラメータ調整が再度必要になるという理由で、異なった機械モデルへの制御手法の適用を複雑にする。しかし、調節すべきパラメータの数は限られており、 γ^{ipsi} の値が指標となっ

てパラメータ調節は半ば自動化されるので、これは重大な困難とはならない。

6.2 踏み出し反射の導入

歩行中の支持脚期間には、それ以上延長することができない限界が常に存在する。このような支持脚期間の上限は、身体の物理的限界により決まる最大歩幅によって最終的に与えられ、歩行速度の増加につれて減少する。すなわち、Section 4.2で述べられた姿勢安定化メカニズムは支持脚期間の調節に依存するので、摂動に対する制御システムの抵抗能力は歩行速度とともに減少する。さらに、制御システムが抵抗できる横方向摂動の大きさにも上限が存在する。例えば、同側の2脚支持期で質量中心の投影点が支持脚接地点によって作られる線を超えてしまえば、ここで提案した制御システムは転倒を防ぐことはできない。

この限界を克服するために、汎用的な脚式移動制御器は、現在の支持脚相に影響する位相調整に加えて、次の支持脚相に影響することが可能な他の安定化メカニズムを実装する必要がある。このようなメカニズムとして広く用いられているものとして、前庭情報を用いた踏み出し反射(Miura and Shimoyama 1984; Raibert 1986; Kimura et al. 1990&2004&2007; Fukuoka et al. 2003)がある。我々は次の発展として当然このような手法の導入を検討している。

7 おわりに

今回我々は、姿勢制御とリズム制御を統合し歩行速度によって一つの制御手法から他の手法へと連続的に切替える能力を有した汎用的な脚式移動の制御器の基礎を示した。今後の展望として、提案した制御器の正当性を確認するために様々な歩行速度を実現すること、そして横方向の摂動下や不整地で歩行実験を行うことを考えている。

謝辞

本研究の一部は科研費・特定領域研究「移動知」:領域番号454の助成を受けて行われました。

References

- [1] Orlovsky, G. N., Deliagina, T. G., & Grillner, S. (1999). *Neural control of locomotion*. Oxford Univ. Press, New York.
- [2] Kimura, H., Fukuoka, Y. & Cohen, A. H. (2007). Adaptive dynamic walking of a quadruped robot on natural ground based on biological concepts. *Int. J. of Robotics Research*, 26(5), 475-490.
- [3] Karayannidou, A., Zelenin, P. V., Orlovsky, G. N., Sirota, M. G., Beloozerova, I. N. and Deliagina, T. G. (2009). Maintenance of Lateral Stability During Standing and Walking in the Cat, *J. of Neurophysiol.*, 101, 8-19.
- [4] Maufroy, C., Kimura, H. & Takase, K. (2009). Stable dynamic walking of a quadruped via phase modulations against small disturbances. In *Proc. of ICRA 2009*, 4201-4206.
- [5] Tsujita, K., Tsuchiya, K. & Onat, A. (2001). Adaptive gait pattern control of a quadruped locomotion Robot. In *Proc. of IROS2001*, 2318-2325.
- [6] Aoi, S. & Tsuchiya, K. (2006). Stability analysis of a simple walking model driven by an oscillator with a phase reset using sensory feedback. *IEEE trans. on Robotics* 22(2), 391-397.
- [7] Ekeberg, O. & Pearson, K. (2005). Computer simulation of stepping in the hind legs of the cat: an examination of mechanisms regulating the stance-to-swing transition. *J. of Neurophysiology*, 94(6), 4256-68.