

# 屋外不整地適応型脚移動体プラットフォーム「鉄犬3」の開発

電通大 福岡 泰宏 木村 浩 高瀬國克

Development of Legged Mobility Platform in Outdoor Environment 'TEKKEN3'

Univ. of Electro-Communications  
Yasuhiro FUKUOKA Hiroshi KIMURA Kunikatsu TAKASE

**Abstract:** We have been trying to induce a quadruped robot to walk with medium walking speed on outdoor irregular terrain based on biological concepts. We design the mechanical system and the neural system consisting of a central pattern generator(CPG), responses and reflexes. TEKKEN2 is successful in walking in outdoor environment with the transceiver. In this paper, we show a newly developed quadruped robot "TEKKEN3". TEKKEN3 is going to be a legged mobility platform in outdoor environment. MPEG footage of these experiments can be seen at: <http://www.kimura.is.uec.ac.jp>.

**Key Words:** Quadruped, CPG, 3D Dynamic Walking in Outdoor Environment , Self-contained, Legged Mobility Platform

## 1 はじめに

不整地を動的に踏破する脚口ボットの開発はこれまでいくつか行われてきた [1]～[3] . 路面の形状がある程度限定されれば、それに基づいた歩行アルゴリズムを作成し動的に適応させることは可能である。しかし、屋外においては、摩擦や剛性の異なる路面、様々な方向への微妙な傾斜、不定型の段差、窪み、および踏むことによって移動する砂利や葉など予測困難な状況は無作為に存在する。そのような屋外における高速脚移動を実現した例としては 6 脚口ボット [4] が挙げられるが、このような脚長が短く、自由度が少ないロボットは足の可動範囲が小さく制限されるため、将来的に、より高度な不整地に適応するのは困難になると考えられる。足の可動範囲が大きくなれば脚間の干渉が問題となるため、脚数は少ない方が好ましいが、少なければ不安定になりやすい。従って、筆者らは 2 脚よりは安定化しやすく 6 脚よりは足可動範囲を確保可能な小型犬に似た四脚口ボット「鉄犬」シリーズを開発した。

鉄犬 2(Fig. 1) は屋外における高さ 4cm 程度の段差の踏破、sagittal 平面内で 10 度程度傾斜した坂の昇降、および小石や枯葉が散乱し、小さな凹凸が無限に存在する林道での自立歩行を可能としている。鉄犬 2 は、このような中程度の不整地踏破を脳幹、および脊髄レベルで制御される不随意歩行によって自律的に行う。ただし、ナビゲーションなど随意的な歩行は操作者が行う。市販のラジコン用送信機によって歩行開始、停止、旋回、速度調節などが可能である。このようなナ

ビゲーション、さらには様々なアプリケーションを屋外で実現するために、新しく開発する鉄犬 3 ではレーザーレンジセンサ、2 眼ステレオカメラを搭載する。このようなセンサを搭載すれば、高い段差の踏破や穴を跨ぐ等の不整地歩行レベルの向上が可能になるだけではなく、屋外におけるナビゲーション、認識などを適用した様々なアプリケーションへの活用が期待される。鉄犬 2 は屋外不整地を高速に踏破する性能を備えているので、さらに、長時間歩行、対人対物接触時の対象の保護、転倒時の破損防止、防水、および防塵のための外装の装着などの機能を備えた鉄犬 3 を開発し、屋外環境でのアプリケーションを実現する脚移動体プラットフォームとなることを目指す。



Fig. 1: Walking in the outdoor environment of Tekken2.

本稿ではまず、2 章において筆者の考える不整地歩行の定義を解説し、それに基づいて、実際に鉄犬シリーズに適用された生物を規範とした歩行制御手法を 3 章において紹介する。そして、生物規範型制御を用いて行った実験の一例とその評価を 4 章において行う。5

章では、屋外で活用できる脚移動体プラットフォームとして耐えうる機能を付加した開発中の鉄犬3の紹介を行う。

なお、鉄犬の歩行実験の映像は <http://www.kimura.is.uec.ac.jp>において公開しているので御覧戴きたい。

## 2 不整地歩行とは

現在の歩行ロボットの制御手法は大きく分けて次の2種類に分類されると考えられる。

(A) 歩行は重心の運動であると考え、転倒しないような全身の重心の軌道を明示的に与え、体全体の関節を一意に制御する。

(B) 体の各部において局所的に行われた制御によって歩行させ、その結果としてリミットサイクルが構成されれば、それが歩行の安定を意味する[9]。

(A)において最も代表的なものはZMPを用いた手法であろう[5]。歩行中の床反力中心点が予め設定されたZMP軌道に一致していれば、歩行を行うには十分となる。つまり以下の真理集合関係が成り立つ。

$$(ZMP\text{ 軌道を満足する}) \subset (\text{歩行}) \quad (1)$$

このように歩行に対する十分条件を設定した場合、限定された確実な歩行を行うのには適しているが、一意に固定された全身の目標軌道が強過ぎる幾何的拘束となって、外乱に対する適応を妨げると考えられる。よって、歩行路面環境が変化した時、再びそれに適合したZMP軌道を用意しなければならないため、無限に不整地が存在する屋外における自律適応性に難があると考えられる。

一方、(B)の手法では「a:遊脚期に足を前に振り出す」、「b:支持脚期に体を支持する」など、それら単一条件では歩行とはならないが、歩行するにあたっては必要となる条件を複数設定し、以下のような真理集合関係を成り立たせる。

$$(a \cap b \cap c \cap \dots) \supset (\text{歩行}) \quad (2)$$

つまり、a,b,cなどの必要条件を満足すれば、様々な路面環境に適応した歩行が可能であるということを示している。しかし、その手法においても、 $(a \cap b \cap c \cap \dots) \cap (\text{歩行})'$ は歩行失敗を意味するため、自律適応性は高いが信頼性は(A)の手法ほど高くない。

以上の点から、慎重かつ確実な歩行が要求される用途においては(A)の手法、歩行の内容は重要ではなく、

様々な歩行路面において高速かつ容易に目的地に到達する能力が求められる用途では(B)の手法を用いることが妥当であると考えられる。我々は後者の用途において活躍する屋外脚移動体プラットフォームの開発を目指しているため、(B)の手法を適用している。

### 2.1 不整地歩行のための必要条件の設定

2章(B)のリミットサイクル方式を用いる鉄犬シリーズのために適用される複数の必要条件は以下のように設定している。

- (a) 遊脚期に脚の振り出しが阻害されないこと
- (b) 支持脚期に体が十分に支持されること
- (c) ピッチ軸まわりにおいて胴体がなるべく水平に保たれること
- (d) ロール軸まわりにおいて胴体がなるべく水平に保たれること
- (e) (a)~(d)で発生する振動の周波数が1つに保たれること

上記必要条件を満たすために鉄犬シリーズに適用された代表的な制御手法を簡単に説明する。(a),(b)を満足するためにはある程度の幾何的な制御が要求されるため、ピッチ軸まわりの腰、および膝関節において、腰関節を原点とした目標値や軌道を設定し、局所的なPD制御を行う(3.1節)。(c),(d)を満足するために、それぞれピッチ、ロール軸まわりにおいて、胴体が傾斜した側面の脚を長く支持し、逆に対側面の脚は遊脚期を長く保っておくという脚相の切替タイミングの調節を行う(3.2節)。

ここで、(a)は遊脚期のトルク調節、(b)は支持脚期のトルク調節、(c)はピッチ軸まわりにおける脚相調節、(d)はロール軸まわりにおける脚相調節であり、それぞれは時間、関節において比較的独立した制御を行うことが可能である。これは個々の制御間における互いの影響を意識することなく振舞いを局所的に考えることが出来るので制御が簡単になる。しかし、個々の必要条件が満足されたとしてもそれらの運動の間に整合性が取れていなければ歩行運動として成り立たない。

### 2.2 非線形振動子の適用

2.1節に挙げられた必要条件(a)~(d)ために適用された局所的な制御によって発生する運動は振動になっている。たとえば、(a)+(b)はピッチ軸腰関節まわりの脚振動であり、(c)、(d)はそれぞれピッチ軸、ロール軸まわりの胴体振動である。これらの振動間の同期

が取れれば、大域的にリミットサイクルを構成し、安定した歩行が行われる。しかし、それぞれの振動は慣性モーメントが異なるために同じ固有周波数を持っていない。従って、複数の周波数の異なる外部振動を同調させる動的な内部要素が必要になる。そこで、非線形振動子を適用する。一般に非線形振動子は次のような特徴を備えている。

- (1) 自身の固有周波数に近い外部振動を入力すると、周波数を変化させて外部振動に同調する。
- (2) 瞬間的な外乱を受けても過渡状態を経て元の振動に収束する。

(1)のような特性を持つ非線形振動子を神経系として備え、身体の感覚情報をそれにフィードバックした結果、身体の各部分に発生する振動が一つの周波数になった時リミットサイクルが構成され、最も安定した歩行が実現される。

また、(2)の特性により、リミットサイクルを構成して歩行中に路面環境から不測の外乱を受けても何周期かするうちに元のリミットサイクルに自律的に再起する。したがって、非線形振動子を備えたシステムは外乱に対しても強い自律適応力を持つと考えられる。

### 2.3 広域安定余裕による評価

リミットサイクルを構成することは非線形力学現象の1つとして概念的に系が安定であるというであるということは理解できるが、どの程度安定であるかの評価は難しい。本研究では、支持脚、遊脚に関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(wide stability margin)とし、安定度を表す指標とする(Fig. 2)。Fig. 2において、遊脚である足がその直後に路面に接地したと仮定すれば、その時の広域安定余裕は従来からある安定余裕と同義になるため、広域安定余裕の確保は歩行のための十分条件となる。これは、遊脚である足が直後に段差の上に乗り上げた場合でも同様に言えるため、不整地歩行の安定評価にも適用できる。

鉄犬は非常に足の接地面積が小さく、かつ約0.4[m/sec]以上の歩行速度ではFig. 2に示すようなトロット歩容で歩くため、従来の安定余裕ではほとんどの期間で不安定となるので、評価基準にならない。そのため、広域安定余裕を用いる。なお、広域安定余裕は運動計画ではなく運動評価に用いられるので、簡単のために慣性力などを無視している。

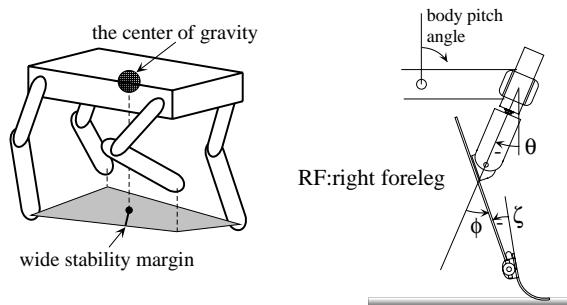


Fig. 2: Definition of

wide stability mar-

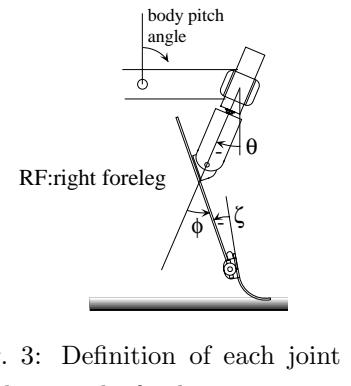


Fig. 3: Definition of each joint

gin.

### 3 生物規範型制御手法

生物は2章で述べた筆者の定義する不整地歩行を行うに適した機能を備えており、様々な屋外の不整地に対して非常に柔軟かつロバストな適応をみせる。具体的に、動物の歩行は主に非線形振動子である「パターン発生器(Central Pattern Generator:CPG)」と抹消からの感覚などによって発生する「反射」の組み合わせにより生成されていること、これらCPGや反射の機構は主に脊髄に存在し脳幹・小脳・大脳など上位中枢からの調節を受けていることは、神経生理学、生物学の知見から広く受け入れられている[6]。

本章では、2.1節で挙げられた必要条件を満足するために鉄犬に適用された生物の神経系を規範としたシステムについて説明を行う。ここで用いられるPD制御の目標値、ゲイン、および各種パラメータなどの値、および詳細は[7, 8]において紹介している。

#### 3.1 脊髄反射機構

2.1節の必要条件(a),(b)を満足するために、動物の伸長反射機構を探り入れる。

歩行中の各関節はFig. 4に破線で示されるような3つの状態(A,B,C)の目標角度にPD制御される。状態C → A → Bと脚が遷移していくことによって、遊脚のスムーズな振り出しが行われ、必要条件(a)が満足されることになる。また、状態B → Cと脚が遷移することによって支持脚期に体がしっかりと支持され、必要条件(b)が満足されることになる。関節の剛性(Pゲイン)は支持脚相で高く遊脚相で低く設定されている。各目標状態の切替えタイミングは次節で紹介する非線形振動子CPGの出力 $y_i$ の正負によって行われる。 $y_i \leq 0$ の時に支持脚、 $y_i > 0$ の時に遊脚になるように切替えが行われる。

ここで、鉄犬2の関節の減速比は小さい(16~84程度)ので、結果としてこのようなPD制御系は機構と組み合わさって比較的剛性の低い仮想バネ・ダンパー系

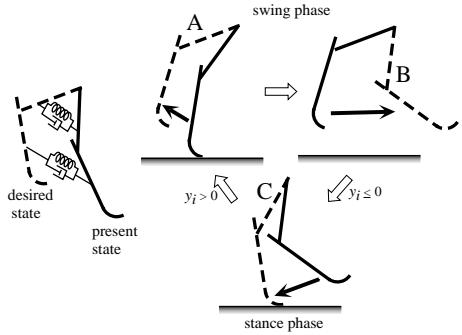


Fig. 4: State transition in the virtual spring-damper system. The desired joint angles in each state are shown by the broken lines.

(バネの剛性と中立点が可変)を構成する。このようなコンプライアンスのある脚関節は、不整地で外乱に対して受動的な適応を発揮し、柔軟な歩行を可能にする。

### 3.2 CPG(Central Pattern Generator)

近年、生物の脊髄に存在し、運動のリズムを生成する非線形振動子 CPG(Central Pattern Generator)[6]の数式モデルを適用した歩行ロボット研究は多く、多賀の2足歩行シミュレーション[9]にはじまり、実機では[10]～[15]などが存在する。しかし、不測の不整地における3次元動歩行を実現しているものは鉄犬シリーズのみである。

2.1節の必要条件(e)を満足するために鉄犬シリーズに適用される非線形振動子は、多賀が2足歩行のシミュレーションに用いた松岡の神経振動子モデル[16]である(式(3))。

$$\begin{aligned} \tau \dot{u}_{\{e,f\}i} &= -u_{\{e,f\}i} + w_{fe}y_{\{f,e\}i} - \beta v_{\{e,f\}i} \\ &\quad + u_0 + Feed_{\{e,f\}i} + \sum_{j=1}^n w_{ij}y_{\{e,f\}j} \\ \tau' \dot{v}_{\{e,f\}i} &= -v_{\{e,f\}i} + y_{\{e,f\}i} \\ y_{\{e,f\}i} &= \max(u_{\{e,f\}i}, 0) \\ y_i &= -y_{ei} + y_{fi} \end{aligned} \quad (3)$$

ここで、一個の神経振動子の出力は  $y_i$  であり、CPGとして一本の脚の支持脚相 ( $y_i \leq 0$ ) または遊脚相 ( $y_i > 0$ )への切替指令のみを出力する(Fig. 4)。

また、CPGへの基本的なセンサ入力として次式で表される「伸張反応」<sup>1</sup>と呼ばれる関節角フィードバック

<sup>1</sup>本稿では、センサ情報に基づくトルク発生を「反射(reflex)」と呼び、センサ情報を CPG にフィードバックすることによる CPG 位相の調節を「反応(response)」と呼ぶ。

クと「前庭脊髄反応」と呼ばれるピッチ面内胴体傾斜角度フィードバックを用いる。

$$\theta_{vsr} = \theta - (\text{body pitch angle}) \quad (4)$$

$$Feed_{\{e,f\} \cdot tsr \cdot vsr} = \pm k_{tsr}(\theta_{vsr} - \theta_0).$$

$$Feed_{\{e,f\}} = Feed_{\{e,f\} \cdot tsr \cdot vsr} \quad (5)$$

ここで  $\theta$  は計測されたピッチ軸まわりの腰関節角度、 $\theta_0$  は立脚静止時の原点、 $k_{tsr}$  はゲインであり、単独の CPG の場合は添字  $i$  を省略している。

このネガティブフィードバックにより、CPG は必要条件(a),(b)によって生じるピッチ軸まわりの脚振動と同調することが可能になる。また、同様にピッチ軸、及びロール軸まわりの胴体傾斜角度にゲインをかけて CPG にフィードバックする緊張性迷路反応[7]を導入することによって、必要条件(c),(d)によって生じる胴体振動に CPG が同調するようになる。

### 4 不整地歩行実験とその評価

ここでは不整地歩行実験の一例として、これまで鉄犬2で困難であった支持脚期の脚の空振りによる転倒の回避を実現するため、再踏み出し反射を導入して段差くだりを試みた実験結果を紹介する。これは2.1節で提案した不整地歩行のための必要条件の(b)「支持脚期に体が十分に支持されること」をより強く満足するために導入される新しい反射である。

実験環境は7cmの高さの下りの段差である。再踏み出し反射を導入しない時の歩行実験データをFig. 5に、導入したときのデータをFig. 6に表す。図中、 $\theta, \phi, \zeta, \text{body pitch angle}$  は、それぞれ腰関節角度、膝関節角度、足首関節角度、ピッチ軸まわりの胴体傾斜角度を表す(Fig. 3)。広域安定余裕(WSM)は鉄犬2の胴体の幅( $w=13.5[\text{cm}]$ )で正規化されている。足首関節は接触センサの役割を果たし、 $\zeta \leq -0.2$ の時は支持脚、 $\zeta > -0.2$ の時は遊脚を表す。

Fig. 5において、1[sec]後に CPG から支持脚相への切替え指令 ( $y \leq 0$ ) が送られたにも関わらず、足が地面に接触せず ( $\zeta > -0.2$ ) 膝関節は伸びきって ( $\phi < 1$ ) いる。これは空振りを意味する。結果的に1.4[sec]後に WSM<0となつて前方に転倒している。

鉄犬2に導入された再踏み出し反射は、具体的には、経験的に足が着くべきであろう腰関節角度(ここでは  $\theta < -0.8 + \text{body pitch angle}$ )、および膝関節角度(ここでは  $\phi < 1.3$ )で足先に接触反応が見られない場合、その状態に各関節を固定して着地し、空振りを防ぐというものである。Fig. 6において、1[sec]付近で  $y \leq 0$  になったにも関わらず、しばらく足先の接触反応はみ

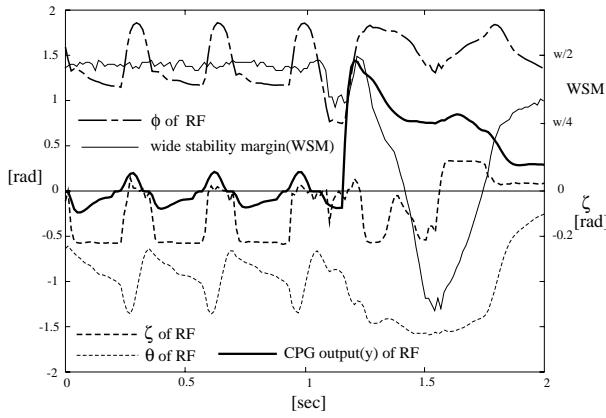


Fig. 5: An experiment of walking down a step 7[cm] in height without a re-stepping reflex.

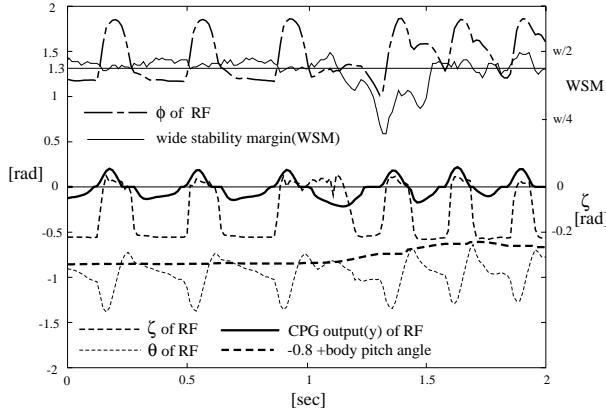


Fig. 6: An experiment of walking down a step 7[cm] in height with a re-stepping reflex.

られない ( $\zeta > -0.2$ )。この時、腰関節、膝関節がそれぞれ-0.8+body pitch angle、1.3[rad]にPD制御されることで脚位置を前よりに保ったまま1.2[sec]あたりで着地してその後の転倒を回避していることがわかる (WSM > w/5)。

この再踏み出し反射を導入することによって屋外でのロバスト性がさらに向上した。

## 5 脚移動体プラットフォーム「鉄犬3」

鉄犬2の屋外での高運動性能を利用して実用的な活用を目指した脚移動体プラットフォーム鉄犬3を開発する。鉄犬3には様々なアプリケーションを可能にするためにステレオカメラ、レーザーレンジセンサなどを搭載する。Fig. 7に鉄犬3の設計図を示す。前後脚はほぼ同じ機構となる。脚の自由度は鉄犬2と同様で1脚4自由度であるが、足首関節は鉄犬1、2と異なりアクティブである。新しく導入された首関節はパン・チルトでアクティブに駆動する。また、背骨にロール軸

まわりにアクティブに回転する関節をもつ。アクティブな尻尾関節も備える。ピッチ軸まわりの腰、膝関節に用いるアクチュエータは60Wマクソン製DCモータ、ヨー軸まわりの腰関節には27.8Wファウルハーバー製DCモータ、足首関節には11Wマクソン製DCモータ、パン・チルト・尻尾関節には1.5Wマクソン製DCモータを用いる。各関節には全てエンコーダを備え、関節角度、および角速度検出を行う。レイトイジャイロと加速度センサの併用により即応性の高い胴体角度検出を可能にする。

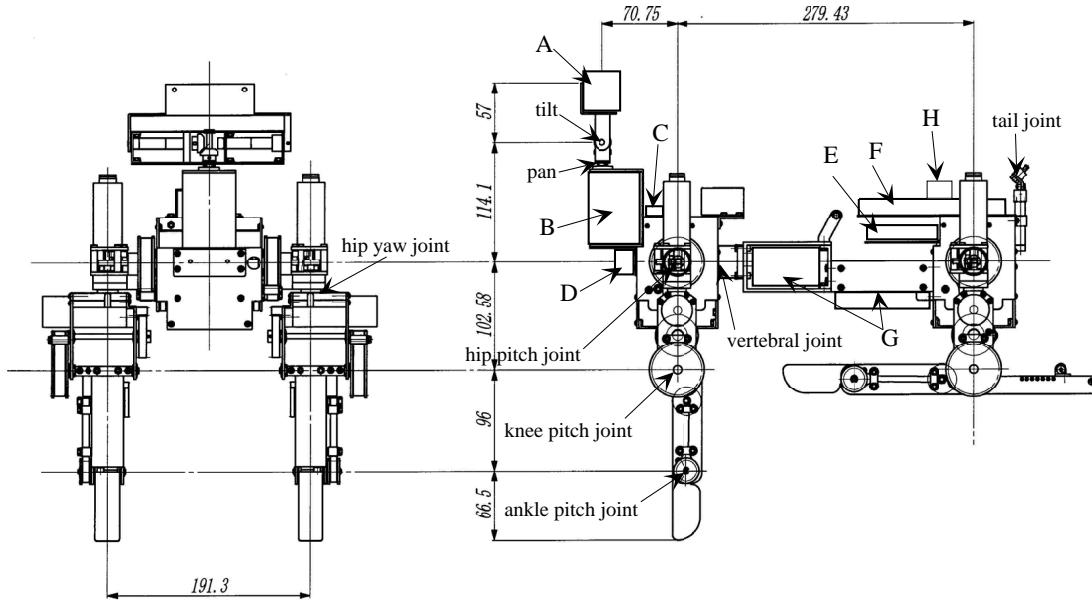
また、冗長な可動範囲で駆動することによる断線を防止する配線処理、対人、対物接触時の対象の保護、転倒時の破損防止、防水、および防塵のための外装の装着を行い、実用に耐えうる耐久性を備える。また、高出力モータ使用による長時間歩行、および2[m/sec]程度の高速歩行の実現が可能である。

## 6 おわりに

脚ロボットは離散的な足接地を行うことから穴を跨げることや、自由度が大きいのでスタッカしたときから高い確率で復帰できること、跳躍ができることなど、車輪やクローラにはない多くの機能で屋外不整地において有用であると考えられる。よって、本研究では屋外不整地に動的に適応可能な四脚ロボット鉄犬2を開発し、林道など歩行路面が無作為に変化する環境に置いてもロバストな歩行を実現することに成功した。こういった屋外を高速移動可能な移動体プラットフォームが存在すれば、それに既存のテクノロジーを搭載することによって、様々なアプリケーションを屋外で実行することが可能である。我々はそのような用途を目指し、屋外での実用に耐える安全性、耐久性を備えた脚移動体プラットフォームのプロトタイプ「鉄犬3」を現在開発している。今後は、様々な屋外でのアプリケーションに適用できるようより高度な不整地踏破性能を鉄犬3に導入していく。

## 参考文献

- [1] J.K. Hodgins and M.H. Raibert: "Adjusting Step Length for Rough Terrain Locomotion", IEEE trans. on Robotics and Automation, vol.7, no.3, pp.289-298, 1991.
- [2] 山口, 木下, 高西, 加藤: “路面形状に偏差のある環境に対する適応能力を持つ2足歩行ロボットの開発,” 日本国ロボット学会誌, vol.14, no.4, pp.546-559, 1996.
- [3] 米田, 飯山, 広瀬: “四足歩行機械のスカイフックサスペンション制御”, 日本国ロボット学会誌, Vol. 12, no.7, pp.1066-1071, 1994.
- [4] U. Saranli, M. Buehler, and D.E. Koditschek: "RHex: a simple and highly mobile hexapod robot", Int. J. Robotics Research, vol.20, no.7, pp.616-631, 2001.



A	two lens stereo vision camera	Bumble Bee	Point Grey Research, 640x480 square pixels at 30 Hz frame rate
B	Laser Range Scanner	URG-X002S	HOKUYO, Distance(20~4000mm), Angle(270°)
C	rate gyro axes around pitch and roll axes	ENC-03M	MURATA
D	acceleration sensor	CXL02LF3	Crossbow, ±2G
E	robot controller	TITech-Wire[17]	OKK, AMD(Eelan SC520)133MHz , OS:RT-Linux PWM(40kHz), A/D converter, counter, RC decoder
F	PC for vision and range sensor	EBC363-1	VIA C3 EBGA CPU1GHz , OS:Linux
G	battery	Lithium Polymer Batteries	Kokam, Lipo1500H(11.1V1500mAh × 2 = 24V) for TITech-Wire and sensors, VIPER1250(11.1V1250mAh × 4 = 48V) for DC motors
H	transceiver	MEGA TECH T3PDF	FUTABA, digital proportional radio control system (3ch, 40MHz)

Fig. 7: Draft of Tekken3.

- [5] 梶田, “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, pp.229–232, 2002.
- [6] S. Grillner: “Control of locomotion in bipeds, tetrapods, and fish,” In Handbook of Physiology, volume II, American Physiological Society, Bethesda, MD, pp.1179-1236, 1981.
- [7] 福岡, 木村, “四足ロボットの生物規範型不整地適応歩行 – 神経- 機械カップリング系構成法の提案とピッチ運動・CPG・ロール運動間相互引き込みの評価 –”, 日本ロボット学会誌, Vol.21, No.5, pp.569–580, 2003.
- [8] 福岡, 木村, 高瀬, “自立型四脚ロボット「鉄犬2」による屋外動歩行”, 第9回ロボティクスシンポジア予稿集, 2004.
- [9] 多賀: “歩行の創発”, 日本ロボット学会誌, vol.15, no.5, pp.680-683, 1997.
- [10] 松浦、石村、和田, 神経系の引き込みによる2足ロボットの歩行運動生成, 日本ロボット学会誌, Vol.22, No.3, pp.56-62, 2004.
- [11] G.Endo, J.Morimoto, J.Nakanishi, and G.Cheng “An Empirical Exploration of a Neural Oscillator for Biped Locomotion Control”, IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, New Orleans, pp.3036–3042, Apr. 2004
- [12] 木村, 秋山, 桜間: “神経振動子を用いた四足ロボットの不整地動歩行と整地走行”, 日本ロボット学会誌, vol.16, no.8, pp.1138-1145, 1998.
- [13] W. Ilg, J. Albiez, H. Jedele, K. Berns, and R. Dillmann: “Adaptive periodic movement control for the four legged walking machine BISAM”, Proc. of ICRA99, pp. 2354-2359, 1999.
- [14] 竹村, 上田, 松本, 小笠原, 神経振動子経由の左右揺動運動・姿勢反射を用いた4脚ロボットの三次元適応歩行, 日本ロボット学会誌, vol.22, no.4, pp.528-534, 2004.
- [15] 土屋, 辻田: “Central Pattern Generator モデルに基づく4脚歩行ロボットの歩行制御”, 日本ロボット学会誌, vol.20, no.3 pp.243-246, 2002.
- [16] K. Matsuoka: “Mechanisms of Frequency and Pattern Control in the Neural Rhythm Generators,” Biolog. Cybern, vol.56, pp.345-353, 1987.
- [17] 福島, 滝田, 広瀬, 中村: “知能ロボット用シリアルバス型制御システムの研究-TITech Wire の開発”, 第7回ロボティクスシンポジア予稿集, pp.155-160, 2002.