

乗用二足歩行機 BiTrekker の研究 基本構造と試作・試乗・シミュレーション

Preliminary study of BiTrekker,
a powered passive bipedal walking machine for the saddle

准 宮腰 清一 (産総研)

Seiichi MIYAKOSHI, AIST, s.miyakoshi@aist.go.jp

In this paper, a semi-autonomous bipedal vehicle based on passive dynamic walking (PDW) principles is proposed. PDW is known as a mechanical system, which is designed to walk down on a shallow slope without active control. To date, some bipedal walking robots have been developed to carry a person on uneven terrains. However, they don't utilize a PDW mechanism; nor they don't use the balancing ability of a human as like a bicycle or motorbike. This paper describes the basic structure of the PDW based human balancing bipedal vehicle, shows the simulation for confirming the feasibility, and reports the test ride of the prototype machine.

Key Words: quasi-passive dynamic walking, human agency vehicle

1. 始めに

近年、パーソナル・モビリティが注目を集めつつある。伝統的には、自転車・バイクがその位置を占めてきたが、並行 2 輪の車輪型倒立振子を基本構造とする「Segway」[1] が発明・商品化され、また、「モビリティ・ロボット」[2] や「U3-X」[3] 等も提案されている。これらは、車輪型である事から舗装路や屋内等の平坦な路面環境を対象とし、近距離の低速度での移動を用途として想定している。

一方、二足歩行ロボットは、その対地投影面積の狭さによる狭隘部での移動や高度のバランス能力による不整地の歩行等を期待され、その応用として、これまでも、ヒトを乗せて動歩行が可能な二足歩行ロボット「WL-16」[4]、「i-foot」[5]、「HUBO FX-1」[6] が試作され、その他にも研究（「マイエージェント」[7]、「Ostorich-I,II」[8][9]、「ZeroWalker-1」[10] 等）が行われてきている。

操縦において、車輪型の機械構造の制御は比較的単純で済むが、脚型の機械構造の制御は安定化を含めて遙かに複雑になりがちである。そのため、階層構造の段数が多くなり、車輪型では身体・物理階層に近い、重心移動による直感的な運動指令の形が実現されているが、脚型では joy-stick 等を用いて移動方向・量を示すような、身体・物理階層から離れた抽象化された高次指令の形で実現されている。搭乗者と機体をまとめて一体のシステムと見た場合、これは構成要素間の結合強度の問題と見る事ができる。要素間でやりとりが行われるものに、上記の操縦局面における情報のやりとりがあり、また、駆動におけるエネルギーのやりとりがある。車輪型において、祖結合なシステムの例は自動車であり、密結合なシステムの例は一輪車であろう。自転車や「Segway」等は、(密結合に近い) 中間的結合強度と言えるだろう。密結合の例においては、ヒトをより強くシステム内に取り込む形で構成されており、ヒトと分担して機能を果たす事により、操縦の自由度も高くなる。脚型においては、前記の乗用二足歩行ロボットの例は、祖結合の例であると言え、逆に、極端な密結合の例としては、Exoskeleton と呼ばれる動力装具（「BLEEX」[11]、Quasi-passive Exoskeleton[12]、「HAL」[13]、「RoboKnee」[14]、あるいは、「パワーベダル」[15]「体重支持型歩行アシスト」[16]、等）が相当すると言える。しかし、自転車やオートバイ、あるいは「Segway」等に相当する(密結合的) 中間的結合強度のものは存在しない。

歩行研究において、受動歩行 (passive dynamic walking) と呼ばれる歩行様態が知られている [17]。これは緩い坂を下る玩具として知られ、制御器や駆動器を含まない機械系であるにも関わらず、自動的に二足歩行様の運動を行わせる事ができる。制御器を含まないシステムの簡潔な構造と非常に緩い坂を下る程度の位置エネルギーで歩行が可能な省エネルギー性との両面で注目されている。

本研究では、車輪型において自転車が占めていた位置を脚型において占めるものが上記の受動歩行ではないか、と考へ、脚型の乗物において自転車のような役割を果たす乗用二足歩行機の構築を目指す。これを BiTrekker (bi + trekker) と名付けて、研究を行っている。受動歩行と同様、機械系の構造自体を歩行に適するように設計し、また、自転車やバイクと同様、ヒトに積極的にバランス維持を分担させ、システムの簡素化とより直感的な操縦性を持たせる。また、乗用二足歩行機に受動歩行を取り入れる事で、非常に少ないエネルギーで、歩行を継続できる可能性がある。実際に、自転車は漕がずに惰性で走行している時間比率も高く、同様の効果を期待している。

2. 基本構造と動作

自転車からオートバイが開発されたように、受動的機械を能動化・動力化するという過程をとる。また、将来的に、制御器によるバランス維持を行う方向で、当初は人間のバランス維持能力に全面的に依存するという過程をとる。こうした開発過程をたどる際に、基盤となりうるものとして、前述の受動歩行と竹馬や義足が考えられ、最終的には、ヒトと機械が渾然一体となって動作する機械システムを構築する事を目指している。

2.1 受動歩行ベース型

Fig. 1 に概形を示す (このモデルを用いたシミュレーションに関しては後段で示す)。2本の脚の上部を回転関節でつないで股関節とし、その上部にサドルやハンドル等を取り付けた概形となる。搭乗者を含めた本体部 (サドルやハンドル等を含む部分) の重心が股関節部よりも高い位置にある場合、上体部がひっくり返り、転倒する虞がある (ただし、必ずひっくり返る訳ではなく、一輪車のように搭乗者の技量により立位を保持する事は可能)。これを防止し、上体部を立位に保持する姿勢維持機構としては、例えば、股関節二分機構 (Bisecting hip mechanism) がある [18][19]。このモデルにおいては、脚部の動きをリンクにより取り出し、後部に置いたデフ・ギア (差動歯車) と接続させる事で、この機能を持たせる構造としている。

搭乗した人間が、前後左右の揺動運動 (8 の字運動 [20]) を行う事で、遊脚振り出しの foot clearance を確保し、遊脚の接地タイミングを調節し、関節や接地面での摩擦や粘性により系から失われる力学的エネルギーを補給し、歩行を継続させる。

受動歩行と同様、周期的定常状態になるまでの過渡期、特に動き始めには、駆動と制御を行う必要がある。簡便性を増すため、二足歩行機の足の甲の部分に搭乗者の足を接触させて直接動かす事を想定している。

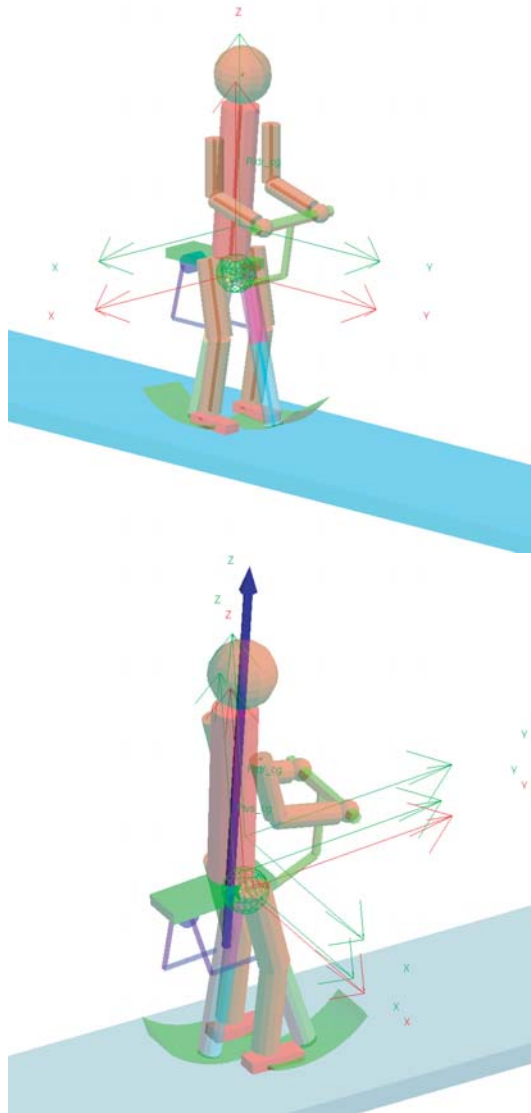


Fig.1 The simulation model of the passive bipedal walker with the saddle, in the dynamical simulator DADS.

2.2 竹馬ベース型

受動歩行ベース型においては、脚長や足首等は固定であり、搭乗者の揺動運動により加えられるエネルギー以外の系へのエネルギー供給は無かった。しかし、脚式の歩行機においては、坂道や階段の昇降が求められる。脚移動においても車輪と同様、水平方向成分の運動のためには殆どエネルギーを必要としない [22]。しかし、垂直方向成分の運動を続けるためには、位置エネルギーを増加（または減少・負の仕事・穏やかに散逸）させる必要がある。

人が足先に付けてバランスをとる遊具として竹馬がある。西洋の竹馬は Stilt と呼ばれ、直接足部に装着して用いられる。これに弾性要素を付加する事により、跳躍力を増大させ、歩行（走行）速度を向上させる道具が提案され、商品としても販売されている「Quickwalker Boots」[23]「Flying Shows」[24]「Power Skip」[25]「Poweriser」[26]。同様の効果を持つエネルギー蓄積足部と呼ばれる下肢装具・義足が、障害者スポーツに用いられている。このように弾性要素を構造に取り入れ、エネルギー消費を抑え、また、搭乗者からも直感的に操作しやすい構造とする。

Fig. 2 に模式図を示す。ここでは、受動歩行を補助する形で、能動化を行う [21]。脚伸縮と脚振りを人力で能動化し、環境対応能力を含む性能を向上させる。

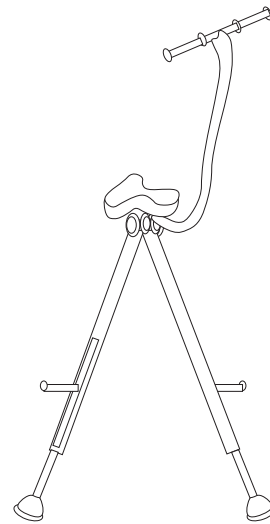


Fig.2 Schematic picture of the powered passive bipedal walker with the saddle

3. シミュレーション

受動歩行ベース型二足歩行機の上で、搭乗者が揺動運動を行う事で、平地上において、歩行運動を連続的に行わせる事が可能であるのかどうか、シミュレーションにより検討した [19]。シミュレーションには、動力学シミュレータ DADS を用いた。

Fig. 1 に示したモデルの脚長は 0.8[m](0.4 + 0.4[m])、足部半径は 0.5[m] とし、歩隔相当の股関節での脚の間隔は 0.15[m] とした。各部の質量を Table 1 に示す。

Table 1 The weight of the each body parts

Part	weight[kg]
Rider	66.01[kg]
Saddle	16.16[kg]
Thigh	2.89[kg]
Shank	3.39[kg]
Foot	0[kg]

地面と接触する足部は曲面状になっており、Fig. 1 においても、外見上、大きく見えるが、Table 1 にも示したとおり、質量を割り当てていない。搭乗者と本体部とを合わせた重心は、ほぼ股関節の真上（正確には前方 5.09354×10^{-3} [m]、0.2273[m]）の位置にある。

股関節二分機構により、脚の二等分線上に本体部の角度が保持される。この本体部に対して、搭乗者、つまりは棒状の分布質量を持つ物体（剛体）が振り回る運動により、連続的歩行を行わせる。この 8 の字の振り回り運動をリサージュ波形により生成する。

現時点では、フィードバックによる安定化を行っていないが、初期条件やリサージュ波形のパラメータを微調整する事で、数秒間の歩行が可能になる。できるだけ長く歩行を続けられるパラメータ探索を行った。評価関数は、歩数が多く、歩幅（股関節角度）が一定で目標値に近く、かつ、歩調が一定である時に良い値となるようなスカラの関数とした。

探索の結果、得られた運動を棒線図の形で Fig. 3 に示す。着地時の両脚間の目標開き角度は 0.5[rad] である。約 4[s] に渡って、10 歩の歩行運動を行わせる事ができた（終盤は立ち止まってしまっている）。この時の搭乗者の 8 の字運動のリサージュ波形の振幅は、前後方向が 1.1125×10^{-1} [rad] で、左右方向が 2.14668×10^{-4} [rad] であり、周波数は 1.28829[Hz] であった。

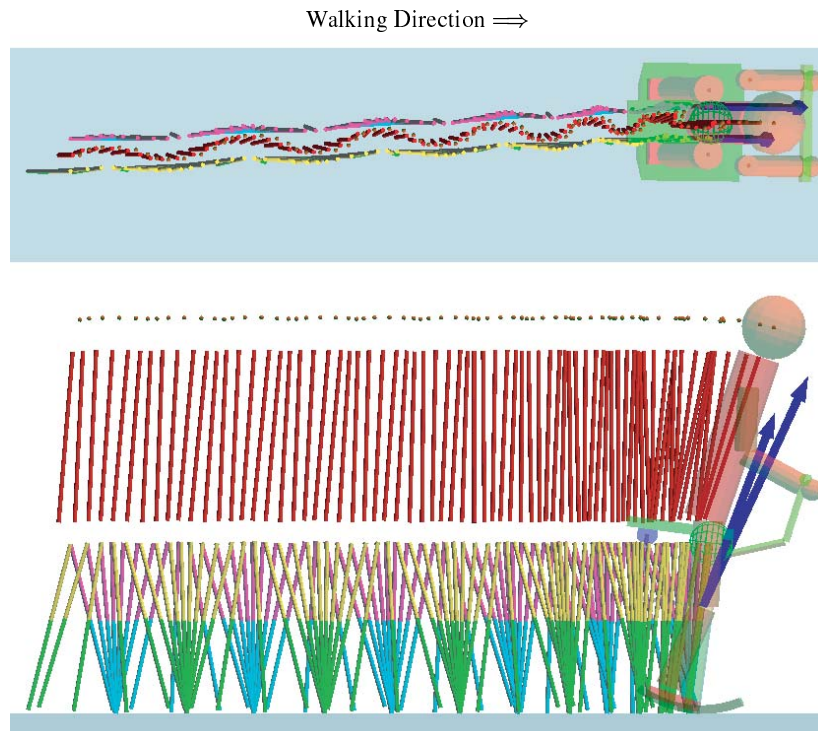


Fig.3 Stick pictures of the 5[s] walking of the passive bipedal walker with the saddle

4. 実機の試作と試乗

実機を製作した。市販のキックボード等を構造材として流用した。デフ・ギアは、三輪自転車用のものを用いている。脚は固定長であり、足裏は鉄板を曲げた物を用いている。脚長は600[mm](100[mm]程度の調整が可能)、重量は15[kg]である。試作機の写真を Fig. 4 に示す。



Fig.4 The prototype of the powered passive bipedal walker with the saddle

試作機の試乗を行った。体系的にデータを取るに至らず、感想に過ぎないが、参考までに以下に記す。

- 脚長が固定であり、全体を側方に傾けないと脚を前方に振り抜けない構造であるため、脚を振り出す動作よりも、側方への揺動動作を主として歩行動作を行う必要がある。
- 固定脚長であるため、前方に傾き始めると、遊脚が余計に振り抜きづらくなると言う悪循環の構造がある。
- 歩行機の足部の脇に、搭乗者が直接地面に足を付けて歩行を行わせるのは、比較的容易である。ただし、歩行機のリズムに合わせた8の字運動をせずに、搭乗者のみが前方に突っ込む形になるとかえって歩行が困難になる。
- 脇に足を着くのではなく歩行機の足部上面に搭乗者の足を載せる形で歩行を行おうとすると、とたんに歩行が難しくなる。脚長固定、足首固定である結果と推測されるが、理由は不明である。今後、可動部分を順々に増やしていく事で、その歩行に及ぼす効果を検証する必要がある。
- 足首部分を固定するよりも、ガタであっても、可動の方が歩きやすい。これは、脚の前方への振り抜き時に、遊脚の引っ掛かりが減る事が原因のようである。
- 両脚の間に紐を張り、歩幅を制限している。着地直前に、遊脚が前方に流れる形で歩幅が広がり過ぎる現象を防いでいる。
- 受動歩行自体の安定性は非常に低く、また、一定の歩調での歩行を強いられる事になる。当面、足裏を大きくする等して、安定性を確保する必要がある。
- ハンドルを強く握って操作するのではなく、むしろ緩く持って、腰から下で操縦する方が、歩行がうまく行く事が多い。
- 搭乗者の両足を引き上げて運動する事は可能だが、歩幅は極端に狭い。当面、足部の延長により安定性を増強する必要があるだろう。

5. 終わりに

受動歩行をベースとした乗用二足歩行機を研究・開発する際の基本構想を示した。ヒトのバランス維持能力をシステムの中に積極的に組み込む事で、制御・駆動系の負担を減らし、より直感的な操縦性を得る事を目指す。

搭乗する人間を倒立振子でモデル化し、受動歩行機と組み合わせたモデルで、動力学シミュレーションを行い、中立安定な運動軌道の存在を示す等、予備的研究を始めている

実際の研究開発に当たっては、搭乗するヒトのモデル化が行えないため、あるいは、ヒトのモデル化を開発と並行して行う必要があるため、試作・改造とテストのサイクルを早く回す必要がある

現在でもヒトの歩行能力は、ロボットのそれを圧倒している。もしも、ヒトの歩行のメカニズムを解明し、それをロボットに実装できれば、大きな性能の改善を図れる可能性が存在する。ヒトの体の構造は複雑であり、特に、運動中に脳・神経系を測定して働きを推定する事は非常に困難であり、ヒトの歩行メカニズムの解明が進んでいるとは言えない。そこで、この歩行機を利用し、機構を全体として簡略化した上で、運動速度と歩幅との関係を計測し、これまでの動力学シミュレーションと照らし合わせて、構成論的アプローチによるヒト歩行メカニズムの解明と利用のツールとする事も期待できる。

新しい乗り物の開発と共に、ヒトの歩行メカニズムの解明、ヒトと強く結びついた機械システムの設計についても一助となる事を目指している。

最後に、実機製作に関し、当センターテクニカルスタッフの有福崇明様、部品を融通して頂いた有限会社 KTV 様に、感謝の意を表します。

文献

- [1] Kamen, D. L., et al., "Personal mobility vehicles and methods," US Patent, 6367817, 2002.
- [2] "トヨタ、『トヨタ・パートナーロボット』の開発概要を発表", News Release, http://www2.toyota.co.jp/jp/news/07/12/nt07_076.html, 2007.
- [3] "人との調和を目指した新たなパーソナルモビリティ技術を開発～前後左右に移動可能な世界初の駆動機構を採用～", News Release, <http://www.honda.co.jp/news/2009/c090924.html>, 2009.
- [4] 菅原 雄介, et al., "搭乗者の受動的運動を考慮した人間搭乗型 2 足歩行ロボットの歩行パターン生成", 日本ロボット学会誌, Vol. 25, No. 6, pp. 842-850, 2007.
- [5] TOYOTA GROUP, "トヨタグループ、愛・地球博でのパフォーマンス・ショー開催内容を発表【添付資料 3】3. 搭乗歩行型ロボット i-foot", News Release, http://www.toyota.co.jp/jp/news/04/Dec/nt04_1201c.html, 2004.
- [6] Kim, J., Lee, J., and Oh, J., "Experimental Realization of Dynamic Walking for a Human-Riding Biped Robot, HUBO FX-1," Advanced Robotics, Vol. 21, No. 3-4, pp. 461-484, 2007.
- [7] 鎌田 徹, "ユーザの運動を代行するパーソナルシステムマイエージェント", 第 12 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, ロボット学会予稿集, pp.915-916, 1997.
- [8] Minakata, H., and Hori, Y., "Fundamental Study of Biped Bike Prototype Controlled by Accelerator and Brake Pedals," Proc. of 4th Int'l Workshop on Advanced Motion Control, Vol. 1, pp. 241-246, 1996.
- [9] 南方 英明, 堀 洋一, "Biped Bike に関する研究-矢状面運動の解析と制御-", 電気学会論文誌 D, Vol. 117, No. 9, pp. 1057-1062, 1997.
- [10] 小沼 洋介, 広瀬 茂男, "二足歩行型階段昇降ロボット Zero Walker-1 の開発", 第 19 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, ロボット学会予稿集, pp. 851-852, 2001.
- [11] Kazerooni, H., et al., "Hybrid Control of the Berkeley Lower Extremity Exoskeleton (BLEEX)," The Int'l J. of Robotics Research, IJRR, Vol. 25, pp. 561-573, 2006.
- [12] Walsh, C., Pasch, K., Herr, H., "An autonomous, underactuated exoskeleton for load-carrying augmentation," Proc. of Int'l Conf. on Intelligent Robots and Systems, IROS, pp. 1410-1415, 2006.
- [13] Kasaoka, K., and Sankai, Y., "Predictive control estimating operator's intention for stepping-up motion by exo-skeleton type power assist system HAL," Proc. of Int'l Conf. on Intelligent Robots and Systems, IROS, Vol. 3, pp.1578-1583, 2001.
- [14] Pratt, J. E., Krupp, B. T., Morse, C. J., and Collins, S. H., "The RoboKnee: An Exoskeleton for Enhancing Strength and Endurance During Walking," Proc. of Int'l Conf. on R. A., ICRA, pp. 2430-2435, 2004.
- [15] 金岡 克弥, "非定型重作業におけるマンマシンシナジーの効果に関する一考察", 第 11 回建設ロボットシンポジウム論文集, pp. 119-124, 2008.
- [16] "Honda, 「体重支持型歩行アシスト」の試作機を公開", News Release, <http://www.honda.co.jp/news/2008/c081107.html>, 2008.
- [17] McGeer, T., "Passive Dynamic Walking," Int'l J. of Robotic Research, IJRR, Vol. 9, Issue 2, pp. 62-82, 1990.
- [18] Wisse, M., Hobbelen, D. G. E., and Schwab, A. L., "Adding an upper body to passive dynamic walking robots by means of a bisecting hip mechanism," Trans. on Robotics, TRO, Vol. 23, No. 1, pp. 112-123, 2007.
- [19] 浅野 文彦, 羅 志偉, "上体を有する劣駆動 2 脚ロボットの動歩行解析股関節二分機構を用いた高効率歩行の実現", 第 25 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, 1G31, 2007.
- [20] 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, pp. 229-232, 2002.
- [21] 宮腰 清一, "メモリ・ベース運動制御による 2 足歩行の制御", 日本ロボット学会誌, Vol. 24, No. 5, pp. 623-631, 2006.
- [22] 宮腰 清一, Cheng, G., 國吉 康夫, "脚伸縮歩行モデルの坂道上歩行", 第 19 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, ロボット学会予稿集, pp. 47-48, 2001.
- [23] "Petrol-powered boot lifts off," BBC News, <http://news.bbc.co.uk/1/hi/sci/tech/820398.stm>, 2000.
- [24] 中松 義郎, <http://dr.nakamats.com/shop/FS/FS.html>, 2007.
- [25] "PowerSkip," <http://www.powerskip.de/mainpage.html>, 2007.
- [26] "Poweriser?," <http://poweriser.co.kr/eng/product/poweriser.html>, 2007.