

二脚モデルの歩行に及ぼす関節ばねの影響

眞 武 友 一 * ・ 御手洗 忠 *
今 井 康 文 *

Influence of Joint Springs on the Locomotion of a Bipedal Model

by

Tomokazu MATAKE, Tadashi MITARAI, Yasufumi IMAI

(Mechanical Engineering)

Abstract

Influence of the joint springs and the initial conditions on the locomotion of the bipedal model has been investigated. The bipedal model, as proposed before, has eight rigid links representing upper and lower legs, feet, the waist, and the upper body, which are jointed each other by pins together with torsional springs. As reported previously, in the monopedal period, a limited range of spring constants are available for the model to move continuously like human walking. However, it has been found that these same values of spring constants are not appropriate for the bipedal period. Continuous movement from monopedal to bipedal period is only possible by employing the different spring constants for different period. Successful combination of spring constants and initial angular velocities of all links for a complete one-step movement is obtained after the trial and error method. Under this condition, the step force of the model varies showing two peaks as in the case of human walking although the second peak, which may be related to the acceleration to the next step, remains quite low.

1. 緒 言

ヒトの歩行を形態的に分ければ、両脚立脚期と片脚立脚期に大別することができる。二脚歩行モデルを用いて、ヒトの歩行のシミュレーションを考える場合でも同様である。歩行モデルの計算¹⁾では、さらに形態を細分し、その区間内での運動方程式の数値解を求める方法を用いた。前報²⁾では、片脚立脚期におけるこれらの運動方程式の解が、連続した歩行状態を表わすため

の必要な条件を調査した。この結果によれば、ヒトの歩行のように連続した動きをするためには、歩行を開始させるときの初期条件（リンクの初期角速度）を一定にすれば、歩行モデルの両脚の膝（ひざ）および股（こ）関節（以下 K joint および H joint という）のばね定数は、ある狭い範囲内でしか成立しないことが明らかになった。

確かに、この歩行モデルのように多自由度系の運動

を、次々に連続して行わせることは難しいことである。狭い範囲ではあるが、ある関節ばね定数と初期条件のもとでは、片脚立脚期におけるモデルの歩行は可能になり、歩行の形態、踏力線図を得ることができ、ヒトの歩行状態のものと比較することができた。

本研究では、前報と同様に歩行モデルの両脚立脚期における、連続歩行可能な関節ばね定数および初期条件を求めること、さらに初期条件のみで、片脚立脚期と両脚立脚期とを連続的に一步の運動として成立し得る可能性について調査、検討した結果を報告する。

2. 歩行モデル

本論文で用いる歩行モデルは、前報²⁾と同様に一般化された二脚歩行モデル¹⁾である。この歩行モデルの各リンクは質量をもち、各関節は回転ばね継手になっている。Fig. 1 は前報に用いた一般化されたモデルの見取図で、本論文に必要なリンクの角度および関節番号のばね定数を示した。添字の数字は前脚が奇数で、後脚が偶数であり、リンクの寸法およびばね定数の取扱い、次の区間への移行条件などすべて前報²⁾と同一で、本論文に不必要な記号等は省略した。

一般化された歩行モデルの歩行は、5 区域の形態に区分されている¹⁾。この区分に従えば、片脚立脚期は、Case5-1-2 の区間に相当し、両脚立脚期は Case3-4 の区間である。これを模式図で示したのが Fig. 2 である。

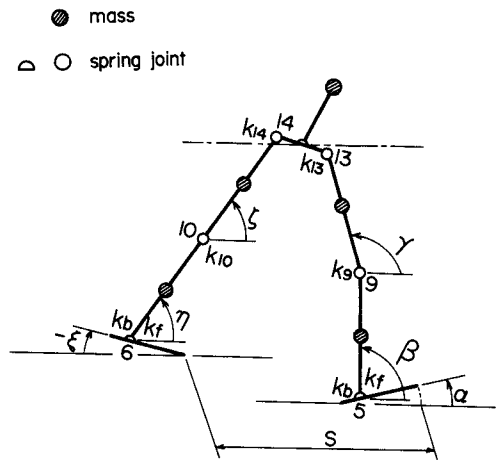


Fig. 1 General view of the bipedal model.

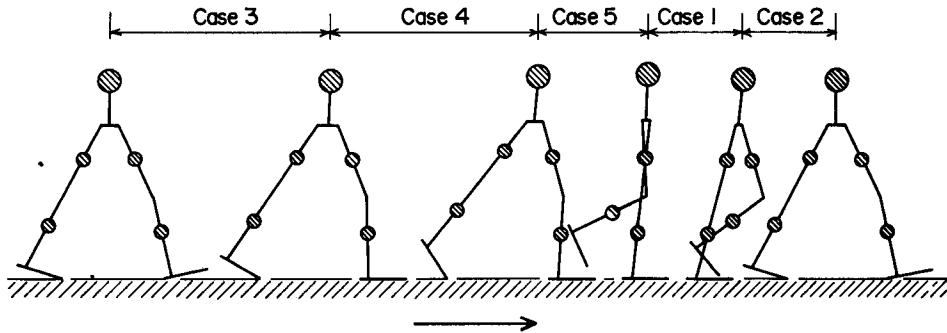


Fig. 2 Postures of locomotion.

3. ばね定数および初期角速度の設定

片脚立脚期における歩行運動の際は、前報²⁾の結果によれば立脚側及び遊脚側、すなわち左右の H joint のばね定数 k (単位はすべて $\text{N}\cdot\text{m}/\text{rad}$) を等しくした場合 ($k_{13}=k_{14}$)、足関節 (以下 F joint という) のばね定数を $k_f=50$, $k_b=100$ に設定すれば、片脚立脚による歩行可能な範囲は、K joint のばね定数で $1070 \leq k_b \leq 1165$, $0 \leq k_{10} \leq 75$, H joint のばね定数では $175 \leq k_{13}=k_{14} \leq 230$ の範囲にある。

本研究でも、片脚立脚期の場合と同一条件および同様の計算方法により、このモデルの両脚立脚期および

一步行程において、歩行可能な関節ばね定数の範囲を求めてみよう。

両脚立脚期は Case3-4 (Fig. 2 参照) であるから、ばね定数を片脚立脚期の場合と同一にして、Case3 の初期条件 (リンクの初期角速度) を求める計算を開始したが、両脚立脚期の歩行が可能な初期角速度 (添字 0 を付ける。単位はすべて rad/sec) は、

$$-6.0 \leq \dot{\beta}_0 \leq -5.0$$

$$0.7 \leq \dot{\gamma}_0 \leq 1.3$$

$$-7.0 \leq \dot{\eta}_0 \leq -6.0$$

である。($\dot{\beta}$, $\dot{\gamma}$, $\dot{\eta}$ はリンクの角速度で、Fig. 1 を参照

のこと) Table 1 にこの範囲にある角速度を用いた計算結果を2つ例示した。

Table 1 Two results of angular velocities in bipedal period and initial angular velocities of Case 5 (rad/sec)

		$\dot{\beta}$	$\dot{\gamma}$	$\dot{\eta}$
ex. 1	Initial angular velocities	-5.0	1.0	-6.0
	At the end of Case 3	-1.82	-2.54	-6.30
	At the end of Case 4	0.19	-4.28	-4.87
ex. 2	Initial angular velocities	-5.5	1.0	-6.5
	At the end of Case 3	-1.95	-2.90	-6.67
	At the end of Case 4	-0.57	-4.06	-5.50
	Initial angular velocities of Case 5 ²⁾	-2.0	-1.51	-2.80

Spring constants of joints (N·m/rad)

$k_f=50$, $k_b=100$, $k_h=1100$, $k_{13}=k_{14}=200$

また、この表には片脚立脚期 (Case 5-1-2) の計算に用いた初期角速度も記入したが、これを見るとわかるように、この2つの例とも Case 4 の終値と Case 5 の初期値は全く違った値となっている。

特に大腿(たい)リンクの角速度 $\dot{\zeta}_0$ は、前報告²⁾ では Case 5 の初期値として $\dot{\zeta}_0=3.5$ を与えている。これは後脚を前に振り出すために必要である。しかるに、Case 4 の終了時には脚が伸び切っているので、 $\dot{\zeta}_0=\dot{\eta}_0$ であるが、Table 1 で Case 4 の終値は $\dot{\zeta}_0=-5.0$ となった。これは前報告²⁾ における Case 5 の初期角速度とは符号が逆である。したがって、ばね定数だけを変化させて Case 4 と Case 5 を円滑に移行させることは難しい。

次に、歩行モデルが両脚立脚から片脚立脚に移って、一步を完全に移動し得るかを検討してみよう。前報²⁾ のばね定数を用いて Case 3→Case 4 の移行は可能であるが、上述のように $\dot{\zeta}_0$ の問題でこのままでは、Case 5 への移行は不可能である。したがって、Case 3→Case 4→Case 5→Case 1→Case 2 の連続した歩行が可能となるためには、片脚立脚期あるいは両脚立脚期の単独歩行の初期条件では意味がなく、改めて全行程の連続歩行が可能な条件を求める必要がある。

このため、新たに初期条件 $\dot{\beta}_0$, $\dot{\gamma}_0$, $\dot{\eta}_0$ および関節ばね定数 k_f , k_b , k_h , k_{10} , $k_{13}=k_{14}$ の種々の組合せを考え、これまでの計算結果を考慮しながら、試行錯誤による膨大な計算から Case 3→Case 4→Case 5→Case 1→Case 2 の連続歩行する初期条件等の組合せ

を得ることができた。その組合せを Table 2 に示す。また、計算結果を Basography で示したのが Fig. 3 (Table 2 No. 4) である。

Table 2 Combination of initial angular velocities and spring constants of joints (angular velocity : rad/sec, spring constant : N·m/rad)

No.	$\dot{\beta}_0$	$\dot{\gamma}_0$	$\dot{\eta}_0$	k_f	k_b	k_h	k_{10}	k_{13}
1	-3.5	0.5	-4.0	35	85	350	100	30
2	-3.5	0.5	-4.0	35	85	350	700	30
3	-3.5	0.5	-4.0	35	85	350	800	30
4	-3.5	0.5	-4.0	35	85	350	100	70
5	-3.5	0.26	-3.0	20	40	350	100	150
6	-3.5	0.26	-3.0	20	40	350	100	200
7	-3.5	0.8	-2.5	20	55	350	150	170
8	-3.6	0.5	-3.0	20	40	350	100	300
9	-3.6	0.5	-3.0	20	40	350	150	300
10	-3.6	0.5	-3.0	20	40	350	200	300

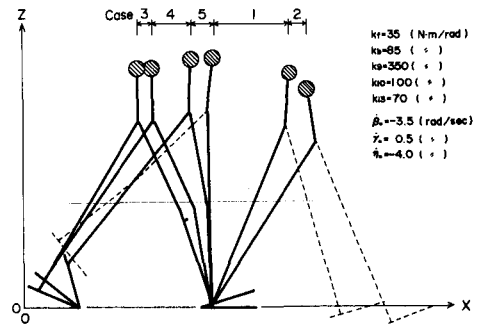


Fig. 3 A basograph of locomotion of the bipedal model.

4. 考 察

4. 1 初角速度とばね定数の関係

前報²⁾の結果を参考にして、 k_h を $1000 \leq k_h \leq 1200$ とした場合、Case 3→Case 4→Case 5→Case 1→Case 2 という歩行を行うためには、初期条件として $-7.0 \leq \dot{\beta}_0 \leq -6.0$, $-6.5 \leq \dot{\eta}_0 \leq -4.0$, $0.5 \leq \dot{\gamma}_0 \leq 1.0$ の範囲を採用するが、Case 5 の最初に、前報²⁾と同様に $3.0 \leq \dot{\zeta}_0 \leq 6.0$ の初角速度を与えてやれば良いことがわかった。しかし、踏力の垂直分力は、いずれの場合も Case 3 において負の値となった。これは足が床から離れようとしていることで、Case 3 の歩行現象としては不適である。

逆に両脚の初速を減少させて、この状態で一歩行程 (Case 3→……→Case 2) の連続歩行ができるため

の、ばね定数の条件を求めてみよう。いま、 $\dot{\beta}_0 > -4.0$, $\dot{\eta}_0 > -4.0$ とし、 $\dot{\zeta}_0$ の値は Case 4 終了時における $\dot{\eta}$ の値をそのまま用いるためには、K joint のばね定数 k_b は、 $300 < k_b < 400$ を用いなければならない。また、このことを確かめるために $k_b \leq 300$ または $k_b \geq 400$ の範囲では、初期角速度をいかに変えても、モデルの歩行は続行できない。結局、Table 2 に示した初期角速度と関節ばね定数の組合せが全てではないにしても、これらの組合せから大きくはずれた値ではあり得ない。

また、この二脚歩行モデルは、初期外力だけでどのような歩行をするのかを調査するもので、前報³⁾のモデルでは連続歩行が可能であった。松葉杖歩行モデル⁴⁾では、ある区域では新たに駆動する必要があった。したがって、このモデルの歩行が Case 3 \rightarrow Case 2 \rightarrow Case 3 と連続して行われるためには、Case 2 終了時における各角速度が歩行の初期、すなわち Case 3 の最初に与えた角速度とほぼ同じ値か、近似的な値でなくてはならない。

いま、本計算結果の一例を、各リンクの角速度の時間経過でプロットしたのが、Fig. 4 および Fig. 5 (Table 2 No. 8) である。これらの図からわかるように、角速度の Case 2 の終了時の値は、Case 3 の最初の値にはなっていない。また、区間の境界では、曲線が急変化して運動が円滑でないことを示している。これは、各区間運動方程式の移行条件に、境界での同一の角加速度を採らなかったためである。しかし、両図を

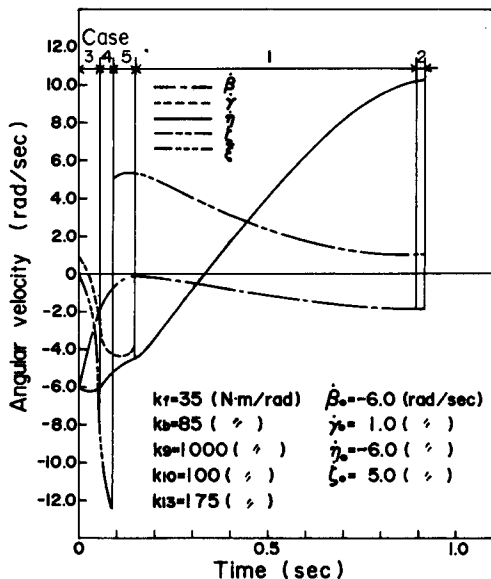


Fig. 4 Diagrams of angular velocities in locomotion.

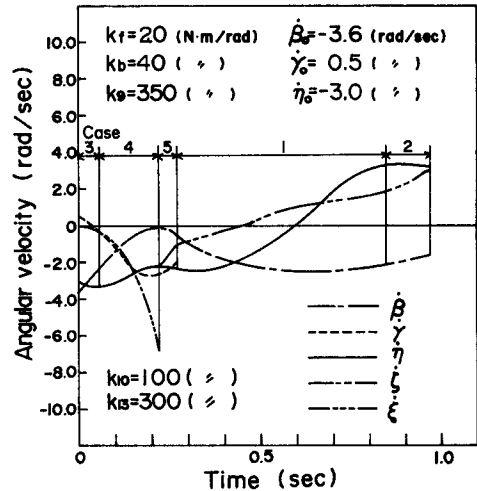


Fig. 5 Diagrams of angular velocities in locomotion. (No. 8 in Table 2)

比較すると Fig. 5 の方が終了値が初期値に近く、初角速度およびばね定数を適当に選べば、あるいは僅かの修正条件で連続歩行の可能性を示している。両図を比較する限り、初角速度もばね定数も小さい方が良いようである。

4. 2 歩行の条件の検討

全区間を通しての連続歩行の可能な範囲の初期角速度とばね定数の関係は、ほぼ明らかになったが、各区間においてもこれらの関係如何によっては、その区間の歩行運動が中断する場合がある。この状態について考察してみよう。

(a) 前脚が前方へ倒れにくい場合：これは β が小さくならない場合で、この対策として先ず考えられるのは、 $|\dot{\beta}_0|$ または $|\dot{\eta}_0|$ の値を大きくすることである。しかし、4. 1 で述べたように、この値はあまり大きくはできない。次に考えられるのは、F joint のばね定数 (k_f , k_b) を小さくすることであるが、これはそれぞれ $20 \text{ N}\cdot\text{m/rad}$ より小さくなると、後脚の足リンクと床とのなす角 ϕ が $|\phi| > 90^\circ$ になってしまい、実情に合わない。3 番目は、H joint のばね定数 (k_h) を小さくすることが考えられるが、 $k_h < 70$ では、遊脚は前方へ少ししか振り出されないで、好ましい状態ではない。

(b) 遊脚の大腿リンクが早めに前方へ振り出されない場合：これは $\dot{\zeta}$ が大きくなりえない場合で、このようにならないためには、後脚に与える初角速度 $|\dot{\eta}_0|$ の値を小さくすることであるが、 $\dot{\eta}_0 > -2.5$ では、 β が小

さくならないのでモデルは後方へ倒れてしまう。次に H joint を大きくすることであるが、 $k_{h3} > 300$ では、重心が後方へ移動し、この場合も後方へ倒れてしまう。

(c) 遊脚の膝(ひざ)が振り出す途中で伸び切ってしまう場合：これは $\eta = \xi$ となる場合で、このような状態では着地の際、突張り作用を起こし、体を後方に押し振って Case 3 に移れない。これを防ぐためには、 $|k_{h0}|$ の値を大きくすることが考えられる。ところが、4. 1 で述べたようにあまり大きな値は採ることができない。また、同様な防止法として、遊脚の K joint のばね定数を小さくすることも考えられるが、 $k_{h0} < 100$ では遊脚が前方へ振り出されないために、体は後方へ倒れる。

これらは、二脚モデルの計算のうち、歩行させるための試行錯誤の際、考慮したことがらの一例であるが、多自由度系の物体の運動が、歩行運動と類似の運動となるために、互いに相反する多くの条件を満足させねばならない難かしさを表わしている。

4. 3 歩行モデルの踏力

本報告で使用した一般化されたモデルは、概観的にはヒトの形態に類似している。そこで、ヒトの歩行中の踏力とモデルのものとを比較してみよう。

本モデルの Case 3 \rightarrow \rightarrow Case 2 の場合の垂直力分布と時間との関係の一例 (Table 2 No.1) を表わし

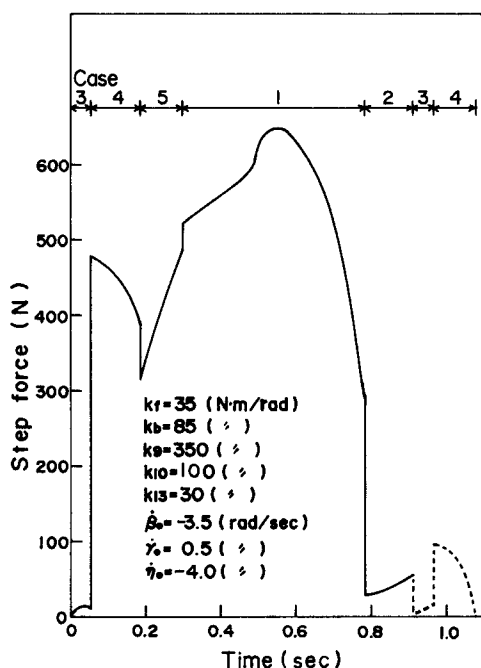


Fig. 6 Step force diagram.

たのが、Fig. 6 である。図中の破線は後脚になった場合であるが、計算値がないので Case 3 および Case 4 における後脚の値を記入した。Case 4 と Case 5 の接続部に不自然な不連続部が見られるが、大別すると 2 つのピーク部があり、第 1 ピークが大きく、第 2 ピークは小さい。この傾向は、片脚立脚期 (Case 5 \rightarrow Case 1 \rightarrow Case 2) の場合と同様であるが、第 2 ピークが小さいことは、踏み切りの駆動時に力が小さいことを意味しており、このままの状態では、次のステップに移行しないことが予想される。

5. 結 論

上体、大腿(たい)および下腿(たい)の各リンクに質量をもち、関節部に回転ばね継手をもつ一般化された二脚歩行モデルを用いて、初期条件及び関節ばねが、両脚立脚期の歩行および両脚・片脚立脚期の連続歩行に及ぼす影響について調査した。

一般化された二脚歩行モデルは多自由度系であるため、運動方程式も煩雑なものになり、さらに一歩行の形態を 5 区域に分けた各区間の解と、歩行形態に類似させるための移行条件とを考慮したため、計算は甚だ複雑なものとなる。したがって、これらの数値計算を行うとしても、仮定すべきパラメーターの組合せは膨大なものになるので、歩行条件を考慮したある値から類推して、試行錯誤を繰返しながら結果を求めざるを得なかった。

前報²⁾の片脚立脚期だけの歩行では、ばね定数がある範囲内にあれば、その中のどんな組合せでもこのモデルは歩行は可能であった。一応この値を基準にして、先ず両脚立脚期の歩行解析を行った。すなわち、片脚立脚期 (Case 5-1-2) の歩行可能な範囲のばね定数を用いて、両脚立脚期 (Case 3-4) の歩行可能なリンクの初期角速度を求めることができた。

次に上述のばね定数を用いて両脚立脚期と片脚立脚期を通して歩行し得るための、リンクの初期角速度を求めたが、一歩行の運動をすることはできなかった。したがって、ばね定数も変化させて一歩行程を運動できるばね定数と初期角速度の組合せを得ることができた。すなわち、両脚・片脚の両立脚期を通して運動できる関節ばね定数と初期角速度が存在する。

また、この場合の垂直踏力線図では、ヒトの歩行に類似の 2 つのピークは生じるが、第 2 のピークは極めて小さい。すなわち、一歩行終了付近では脚力が著しく減少している。他方、一歩行終了時 (Case 2 終了時) の前脚は、K joint が伸び切っており、前脚リンクの角

速度も初期のものとは方向が逆であり、このモデルが次の歩行を連続して行うことは、この状態では不可能である。したがって、歩行を連続して行うためには、一歩行終了時に新たな加速を与えることが必要となる。ヒトの場合は、筋肉によって、この必要にして十分な加速を、そのつど行っている。したがって、制御機構をもたない自由振動系のモデルの運動の研究は、生理膝（ひざ）や快適な義足の開発に役立つものと考えられる。

なお、数値計算には長崎大学情報処理センターの電子計算機 FACOM M-180IIAD を使用した。

文 献

- 1) 真武, 今井, 御手洗; 長大工研究報告, vol. 16, P. 1, (昭56-1).
- 2) 真武, 御手洗, 今井; 長大工研究報告, vol. 18, P. 1, (昭57-1).
- 3) 真武, 今井, 御手洗; 長大工研究報告, vol. 15, P. 1, (昭55-7).
- 4) 真武, 御手洗, 今井; 長大工研究報告, vol. 17, P. 1, (昭56-7).