

4 脚歩行機械の研究

— 固定脚先軌跡を持った4脚歩行機械による静動遷移歩容 —

田口 幹・河原崎徳之・田嶋 裕二

A Study on a Quadruped Walking Machine

— Static-Dynamic Transitional Gait for Quadruped Walking Machine with Mechanically Fixed Tiptoe Trajectory —

Kan TAGUCHI, Noriyuki KAWARAZAKI and Yuji TAJIMA

Abstract

Although there are many studies on the gait control for a quadruped walking machine with 3 D.O.F. to each leg, the authors have developed a quadruped walking machine with fixed tiptoe trajectory to reduce control task for control CPU. In this report, we propose a transition gait between crawling gait and trot gait for such a quadruped walking machine. The prototype machine CANCER-VIII with fixed tiptoe trajectory was made to certify the proposed transition gait. We also realized the transitional gait for trot gait with duty factor β from 0.8 to 0.5 with that prototype machine.

Key words: Quadruped walking machine, Gait control, Transitional gait

1. はじめに

移動機械の行動範囲を広げるためには、平坦地に限定されない移動形態が必要である。不整地における高い対地適応性を発揮する移動形態の一つとして挙げられるのが脚を用いた移動機械である。脚を用いた移動形態の特徴としては、接地点が不連続な移動ができ、接地点を自由に選択できる。そのため、階段の昇降、障害物を非接触で跨ぎ越える移動などに適している。また、静止時にたとえ不整地であっても脚が姿勢保持のための支持脚となり、胴体を安定に保つことができるといった利点をもつ。

本研究室では、これまで改良チェビシェフリンク機構とパンタグラフ機構を用いた歩行機械の研究を行ってきた¹⁻⁴⁾。これらの機構を用いることにより、歩行に

必要な脚先軌跡を1自由度で得ることができる。よって制御の簡略化、本体の軽量化を図ることができる。また、この機構では、支持脚相時の床反力は脚駆動に対してほとんど逆トルクとして作用しないため、エネルギー消費が少ないという特徴がある。

4脚歩行機械の歩容には、静歩行と動歩行がある。静歩行は常に静的な安定を保つので、作業を行いながらの移動や不整地の移動など安定を必要とするときに向いている。一方、動歩行は、最大移動速度や移動エネルギーの点で静歩行より優れるが、動的にバランスを保つ必要があり、場合によっては左右の揺動が大きく生じてしまう。4脚歩行機械を移動機械として利用するためには、安定を必要とする場面では静歩行、高速に移動するときは動歩行といったように、歩容を状況に応じて自由に選択する必要がある。そして、これらの歩容を滑らかにつなぐための遷移歩容が必要となる。

本報告では、これまでの試作機と同様の機構を採用した固定脚先軌跡を持つ4脚歩行機械を用いて、静歩

1995年9月16日受理

* 機械システム工学科

行と動歩行を行い、さらに静歩行から動歩行、動歩行から静歩行へ遷移する遷移歩容を実現したので報告する。

2. 4脚歩行機械のモデル

本研究で対象とするモデルは、Fig. 1 に示すような4本の脚を持つ4脚歩行機械で、1脚の自由度は2自由度である。歩行機械の座標系は、歩行機械の胴体重心を原点として、歩行機械の前後方向にx軸、左右方向にy軸、上下方向にz軸とする。各脚はxz平面内で歩行に必要な脚先軌跡を描く1自由度を有し、さらに脚全体がy軸方向に動く1自由度を有する。前述のとおり、脚のストロークは、機構的に固定されている。

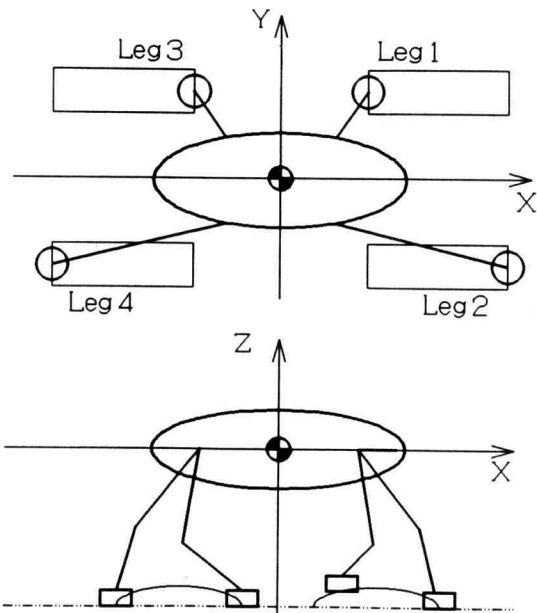


Fig. 1. The quadruped walking machine

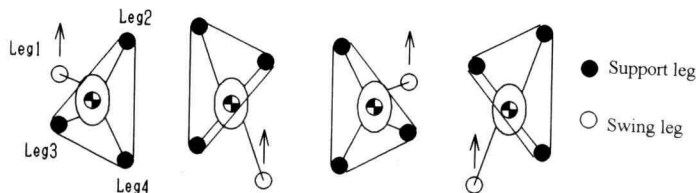


Fig. 2. Crawl gait

3. 脚歩行機械の歩容

3.1 歩行の種類

4脚歩行機械の歩容は安定性の保持の観点から、静歩行、動歩行、準動歩行の3つに大別できる。ここで、 β はデューティ比(脚の1サイクル時間あたりの支持脚時間の割合)である。

静歩行は、 $1 > \beta \geq 0.75$ の範囲で行うことのできる歩容である。歩行中の支持脚数は常に3以上であり、支持脚がつくる支持脚多角形内に重心を常に保つことにより、どの時刻においても静的に常に安定となる歩容である。この場合、歩行機械の運動が余り速くない限り静的安定条件を考慮する必要がないので、歩容計画が簡単になるという利点がある。

動歩行は、 $0.5 \geq \beta > 0$ の範囲で行うことのできる歩容である。歩行中の支持脚数が2以下であり、重心を支持脚多角形上に保てないため、動的に歩行機械のバランスを常に保たなければならない歩容である。動歩行は静的に不安定であるので、歩容の計画が静歩行に比べて複雑なものになる。しかし、デューティ比 β を小さくすることが出来るため、最大移動速度や移動エネルギーの点で静歩行より優れている。また、 $0.5 > \beta$ の状態では、1脚支持期のある歩容となり、歩行させるのが困難である。

準動歩行は、 $1 > \beta > 0.5$ の範囲で行うことのできる歩行で、歩行中の支持脚数が3以上である場合と2以下である場合が混在する歩容である。つまり、静歩行と動歩行が混在する歩容である。

静歩行において最も安定性が良い歩容は、クロール歩容(Fig. 2)である。また、 $\beta = 0.5$ における動歩行は、脚の組み合わせを考えると6組、左右対称性を考慮すると3組の歩容が存在する。これらは、トロット歩容(Fig. 3)、ペース歩容(Fig. 4)、バウンス歩容(Fig. 5)と呼ばれている。

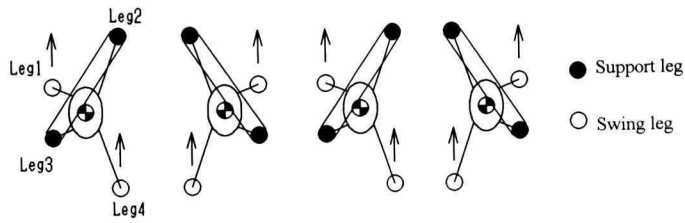


Fig. 3. Trot gait

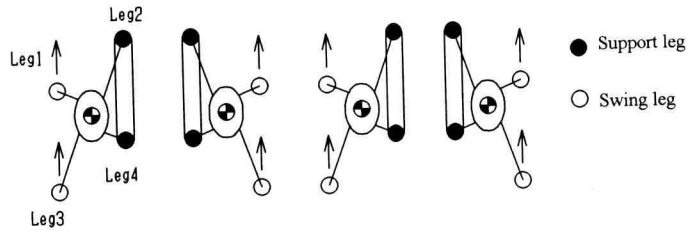


Fig. 4. Pace gait

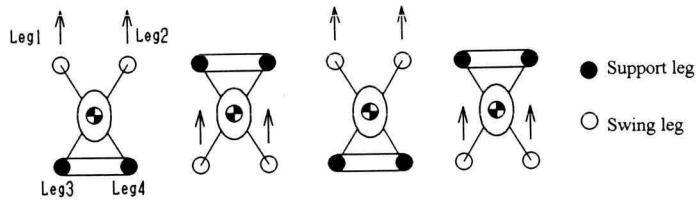


Fig. 5. Bound gait

3.2 遷移歩行

本研究で用いる4脚歩行機械は静歩行ではクローラ歩容, 動歩行ではトロット歩容を採用する。そこで, クローラ歩容とトロット歩容を接続する遷移歩容が必要となる。そのときのデューティ比 β の範囲は, $1 > \beta \geq 0.5$ とする。

静歩行から準動歩行, 動歩行へ遷移させるには, デューティ比 β を減少させてゆけばよいわけであるが, 実際にはそう単純ではない。その原因は, 支持脚相中に脚と地面は相対的に運動することができないことにある。クローラ歩容での支持脚の間隔を例にとると, 支持脚の間隔はデューティ比 β の関数となっている。そのため連続的に β を変化させてしまうと支持脚の脚間隔を着地状態で変化させることになり, 脚と地表に滑りが生じてしまうことになる。よって歩容を遷

移させるためには, ある遷移過程としてのステップをとり, 各脚の遊脚時にその脚のデューティ比 β を変化させ, その前後で β を不連続に変化させることで遷移歩行させる。一定のデューティ比 β のままクローラ歩容からトロット歩容への遷移など基準歩容を遷移させるときにも同様のことがいえる。この場合も脚の位相差が変化するので, 直接遷移させると脚と地表に滑りが生じるため, 遷移過程の段階をへる必要がある。

本歩行機械では脚先軌跡が機構的に拘束されているので, 通常各脚3自由度を有する歩行機械の遷移歩容は用いることができない。そこで, 脚先軌跡が拘束されている場合の遷移歩容を新たに提案する。まず, 次のような前提条件を設定する。

- (1) 遊脚期の脚先の加速度は考慮しない。
- (2) 脚ストローク λ は一定とする。これは, 機構により決定する。

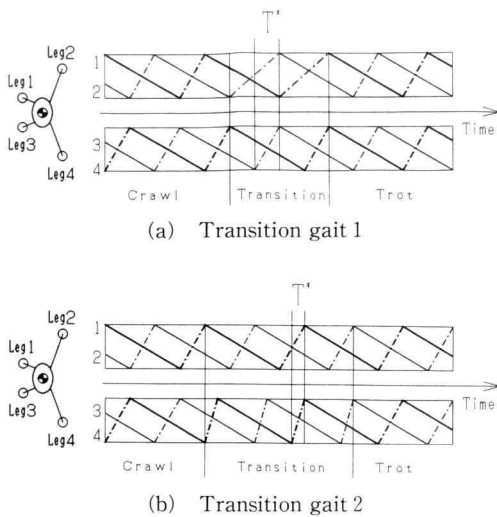


Fig. 6. Proposed transition gait diagrams

(3) 遷移過程において重心移動速度 V_g は一定とする。

この前提条件をもとに生成した遷移歩容は2通り考えられる。この歩容線図を Fig. 6 に示す。

(a) は1脚, 2脚の遊脚復帰速度 V_r を一時的に遅くすることによって, 位相を変化させトロット歩容に遷移させている。

(b) は3脚, 4脚の遊脚復帰速度 V_r を一時的に速くすることによって位相を変化させている。

しかし, (a) の遷移方法には, 支持脚の間隔が狭い2脚支持期間 T^* が (b) より長い時間存在するため, 遷移過程において (b) に比べ (a) は不安定になる可能性がある。そこで, 本研究では (b) の遷移方法を採用する。

ここで提案した遷移歩容では, 3脚, 4脚の位相を1脚, 2脚の位相と同じになるように遊脚復帰速度を変化させるだけなので, 脚駆動制御が容易になるというメリットもある。

3.3 支持脚領域と重心投影点

トロット歩容には, 2脚支持期間が存在する。クロール歩容時には, 安定性を増すために左右の脚の幅を広げた方がよい。しかし, その脚幅のままでもトロット歩容にすると, 2脚支持期間においては Fig. 7(a) のように重心投影点を支持脚領域の中に常に保つことができず, 2脚支持期間の最初と最後に重心の投影点が支持

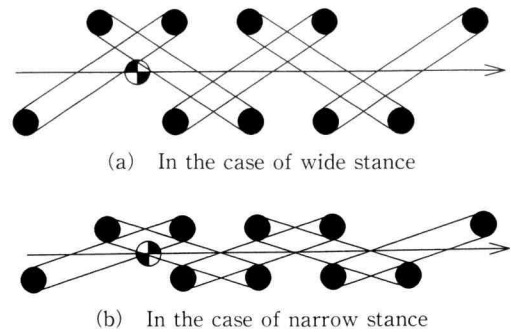


Fig. 7. Center of gravity in a dynamic gait and the relation between the support leg range

脚領域外に出てしまうことになる。このような状態で歩行させると, 左右に大きく揺動してしまう。そこで, より安定したトロット歩容を考えるとき, 重心投影点を支持脚領域に保つような歩容をさせることが必要となる。広瀬ら⁵⁾は胴体の重心を左右に揺動させる歩行を実現しているが, 著者らは Fig. 7(b) のように左右の脚幅を狭めることによって, 2脚支持期でも重心投影点を支持脚領域に保ち, 静的安定をできるだけ保つような歩容を行わせる。

また, 遷移歩行において, 遷移前のクロール歩容では脚の幅を広くし, 遷移過程の遊脚復帰時に脚の幅を狭め, 遷移後のトロット歩容では脚の幅を狭めた状態で歩行させ, 遷移後の動歩行にも安定した歩行を行わせる。

4. 試作歩行機械 (CANCER-VIII)

最初に, 脚の形態について述べる。生物を規範にした脚の形態は, I型脚とM型脚に分類されている (Fig. 8)。I型 (insect) は, 昆虫・は虫類等に見られる形態で, 重心を低くでき安定した静歩行に向く。M型 (mammal) は, ほ乳類に見られる型脚で一般に重心が高く, 動歩行に向く。なぜならば, 長い倒立振り棒ほど立て易いと同様, 重心位置が高い分倒れ込みに時間が掛かり, 動歩行させるのに有効だからである。よって, CANCER-VIII は後者のM型を採用している。

CANCER-VIII は, 遷移歩容を実現するために, 脚先軌跡生成 (歩行) のための脚機構ユニット4つと本体から構成されており, 各脚ユニットは左右に可動できる構造となっている。

脚機構ユニットは, これまで著者らの試作した歩行

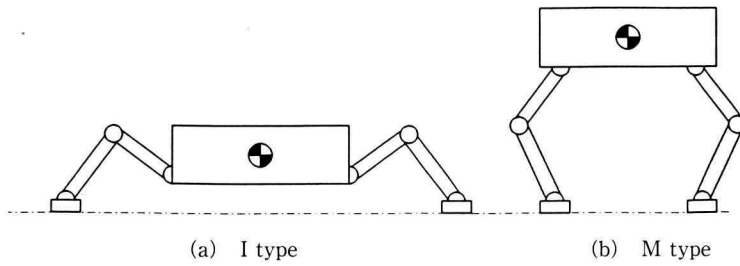


Fig. 8. Two types of quadruped creatures

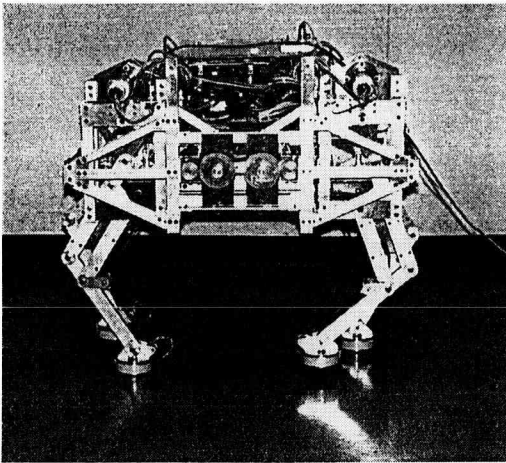


Fig. 9. CANCER-VIII

機械と同様に、改良チェビシェフリンク機構とパンタグラフ機構から構成されている。改良チェビシェフリンク機構によって生成される脚先軌跡をパンタグラフ機構により3倍に拡大する。このときの歩幅は180

Table 1. Specification for CANCER-VIII

Length	580[mm]
Width	420[mm]
Height	580[mm]
Stride	180[mm]
Stance	165~275[mm]
Weight	20[kg]

[mm]である。この機構は構造上、重力方向分離駆動(GDA)⁹⁾になり、自重は脚駆動用アクチュエータの負荷にはならない。CANCER-VIIIをFig.9に、諸元をTable1に示す。

また、センサ類は、直動機構の位置検出に直動ポテンシオメータ、脚機構軌跡位置検出にロータリーエンコーダと直動ポテンシオメータを併用している。また、脚裏には着地確認のためリミットスイッチを配している。

脚ユニット直動機構

本体には、各脚機構ユニットをそれぞれ進行方向に対し左右方向に移動させるために4つの直動機構を配している。水平面内における脚部のY軸方向への自由

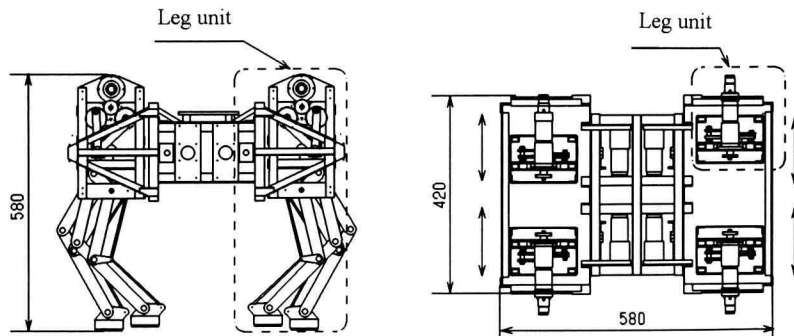


Fig. 10. Straight drive mechanism

度は、脚ユニットを直動ボールネジによって移動させることにより実現した。このことにより、4脚歩行機械が静歩行から動歩行へ遷移する際の不安定な2脚支持期に脚先を左右にずらしたり、動歩行時に脚先を内側に入れることができるので、重心投影軌跡を支持脚領域内に維持しつつ安定した歩行をすることができる (Fig. 10)。CANCER-VIIIは、1ユニットにつき2自由度、合計8自由度をもつ。アクチュエータは減速機付きのDCサーボモータを使用している。

5. 歩行実験結果

試作歩行機械 (CANCER-VIII) を使い歩行実験を行った。歩行モードの指定方法は、パソコンからの指令がRS-232Cを通して制御システムのメインCPUに送られ、歩行が開始される。電源は外部から供給し、静歩行、動歩行、遷移歩行、及び直動機構により脚幅を変化させる歩行実験を行った。

5.1 クロール歩行実験

まず、クロール歩容の実験を Table 2 の状態で行った。脚幅は最大に開き固定した。実験より、安定したクロール歩行を行うことが確認できた。

5.2 トロット歩行実験

次にトロット歩容の実験を Table 3, Table 4 の状態で行った。脚幅を最大固定にしたトロット歩行では左右への揺動が大きく非常に不安定であったのに対し、この実験では安定したトロット歩行を行うことが確認

Table 2. Crawl gait experiment

	Stance [mm]				Duty factor β	Speed[mm/s] V_g
	S 1	S 2	S 3	S 4		
Crawl gait	137.5	137.5	137.5	137.5	0.75	40

Table 3. Trot gait experiment 1

	Stance [mm]				Duty factor β	Speed[mm/s] V_g
	S 1	S 2	S 3	S 4		
Trot gait	137.5	137.5	137.5	137.5	0.71	72

Table 4. Trot gait experiment 2

	Stance [mm]				Duty factor β	Speed[mm/s] V_g
	S 1	S 2	S 3	S 4		
Trot gait	82.5	82.5	82.5	82.5	0.71	72

できた。この2つの歩行を比較して、トロット歩行の場合、脚幅を狭めることによって左右への揺動が抑えられることを確認した。

5.3 遷移歩行実験

次に、遷移歩容の実験を行った。遷移方法としては、先に述べたようにデューティ比 β を一定にしたまま脚の位相差だけを変化させ、クロール歩容からトロット歩容への遷移を行なわせ、脚の間隔の違う以下の4つの実験を行った。

遷移歩行実験 1

脚幅を最大固定にした場合 (Table 5)。

遷移歩行実験 2

脚幅を最小固定にした場合 (Table 6)。

遷移歩行実験 3

遷移過程において、遊脚期に脚幅をどの脚も一定の割合で狭めた場合 (Table 7)。

遷移歩行実験 4

脚幅を次第に狭めるのは実験3と同じであるが、遷移過程の不安定な2脚支持期間において、胴体が揺動し転倒するのを防ぐ位置に脚先の着地点をもって行くよう直動機構で脚幅を変化させた場合 (Table 8)。

遷移歩行実験4の様子を Fig. 11(a)~Fig. 11(c) に示す。

以上4つの遷移歩行実験で次のような結果が得られた。

Table 5. Transition gait experiment 1

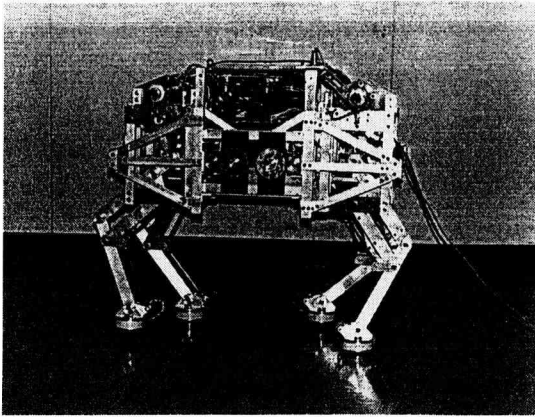
	Stance [mm]				Duty factor β	Speed[mm/s] V_g
	S 1	S 2	S 3	S 4		
Crawl gait	137.5	137.5	137.5	137.5	0.75	40
Transition gait	137.5	137.5	137.5	137.5	-	40
Trot gait	137.5	137.5	137.5	137.5	0.75	40

Table 6. Transition gait experiment 2

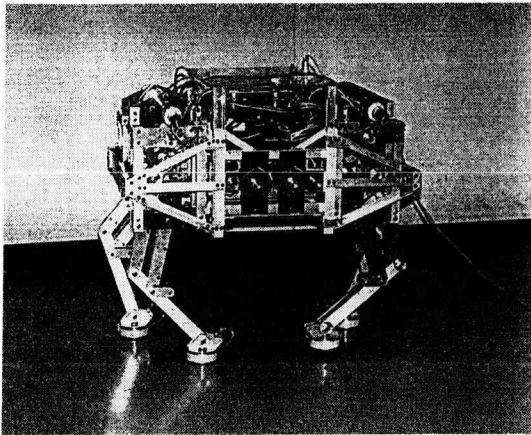
	Stance [mm]				Duty factor β	Speed[mm/s] V_g
	S 1	S 2	S 3	S 4		
Crawl gait	82.5	82.5	82.5	82.5	0.75	40
Transition gait	82.5	82.5	82.5	82.5	-	40
Trot gait	82.5	82.5	82.5	82.5	0.75	40

Table 7. Transition gait experiment 3

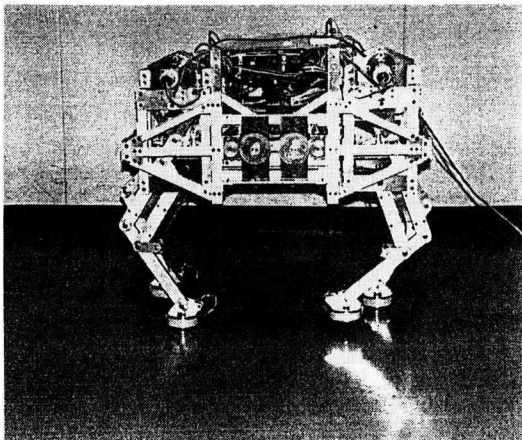
	Stance [mm]				Duty factor β	Speed[mm/s] V_g
	S 1	S 2	S 3	S 4		
Crawl gait	137.5	137.5	137.5	137.5	0.75	40
Transition gait	110.0	110.0	110.0	110.0	-	40
Trot gait	82.5	82.5	82.5	82.5	0.75	40



(a) Walking experiment



(b) Walking experiment



(c) Walking experiment

Fig. 11 Walking experiment of transition

Table 8. Transition gait experiment 4

	Stance [mm]				Duty factor	Speed[mm/s]
	S 1	S 2	S 3	S 4	β	V_g
Crawl gait	137.5	137.5	137.5	137.5	0.75	40
Transition gait	110.0	115.0	105.0	110.0	-	40
Trot gait	82.5	82.5	82.5	82.5	0.75	40

- 遷移歩行実験 1

遷移過程での遷移歩容と遷移後のトロット歩容において、胴体の左右への揺動が激しくなった。

- 遷移歩行実験 2

遷移前のクロール歩容と遷移過程の遷移歩容において、胴体の左右への揺動が激しくなった。

- 遷移歩行実験 3

遷移過程の遷移歩容の2脚支持期間で左右への揺動が激しくなった。

- 遷移歩行実験 4

実験3と比較すると遷移過程における左右への揺動が抑えられたが、遷移過程でわずかな揺動が確認された。

これらの遷移歩行実験により、クロール歩行からトロット歩行、またはその逆の遷移歩行が実現できることを確認した。また、脚幅を変化させることによって胴体の左右への揺動が抑えられることも確認した。

6. おわりに

本研究では、改良チェビシェフリンク機構とパンタグラフ機構を用いた、試作4脚歩行機械(CANCER-VIII)を対象に、静歩行(クロール歩容)と動歩行(トロット歩容)を実現し、それらを接続する遷移歩行の歩容を新たに提案し実際の歩行実験を行い検証した。また、脚幅を歩容にあわせて変化させ、重心投影点を支持脚領域内に保持することによって、胴体の揺動を抑えられることを確認した。

以上のように、固定脚先軌跡を持つ4脚歩行機械で静歩行、動歩行およびそれらの間の遷移歩行を実現した。今後は、遷移過程における揺動を抑えるようより安定した遷移歩容を確立すること、そして、より安定した動歩行を行わせるために、積極的に重心位置を制御する等の課題が残されている。

参考文献

- 1) 田口, 竹垣, 宮城: “6脚歩行機械の研究”, 第8回

- 日本ロボット学会学術講演会 pp. 279-280 (1990).
- 2) 田口, 高津, 金子, 宮城: “4脚動的歩行機械の研究”, 第9回日本ロボット学会学術講演会予稿集 pp. 905-906 (1991).
 - 3) 田口, 高津: “4脚歩行機械の研究”, 第10回日本ロボット学会学術講演会予稿集 pp. 565-566 (1992).
 - 4) 田口, 林: “4脚歩行機械の研究” 第11回日本ロボット学会学術講演会予稿集 pp. 635-636 (1993).
 - 5) 広瀬, 米田: “4足歩行機械の静動融合歩容とその連続起動生成”, 日本ロボット学会誌 Vol. 9, No. 3, pp. 267-275 (1991).
 - 6) 広瀬, 梅谷: “歩行機械の脚形態と移動特性”, バイオメカニズム 5, pp. 242/250, (1980).