

昆虫の足の動きに関する研究

A Study on Leg's Motion of Insects

菊地 吉郎・加藤 岳仁^{*1}

Kichiro KIKUCHI・Takehito KATO

1. 諸言

昆虫は約 4 億年前に地球上に現れてから現在にいたるまで、その基本的構造を殆んど変えることなく極限の状態で繁栄を続けている。昆虫の特徴の 1 つである 6 足歩行は、独立した足により移動を行う為多少の凹凸による影響を受けず、平地以外での移動手段として非常に優れた方法であると考えられる。本研究では昆虫の前進移動における運動のメカニズムや特性を解明することを目的とし、昆虫の中でも特に体長に比べて移動速度がたいへん速い蟻及びゴキブリとそれ以外の蟻螂、ナナフシ、カナブン、クワガタの 6 つの昆虫を対象とし、それらの足を動かす順序、前進移動の際の速度、周波数、接地率¹⁾、各脚の節の角度変化を比較することによりその一端を解明したので報告する。

2. 実験装置及び方法

Fig.1 に実験装置を示す。ハイスピードビデオカメラ(フォトン FASTCAM-hvc-1)を用いて、均等な升目を引いた紙の上を移動する昆虫をその上方から撮影した。またそれぞれの対象物の速度と大きさに合わせて適当なレンズ、取り込み速度を決め、最も適した映像が得られるように撮影を行った。ナナフシ及び蟻螂は取り込み速度を 120 コマ/秒、カナブン及びクワガタは取り込み速度を 240 コマ/秒及び 480 コマ/秒とし、接写レンズを用いた。又ゴキブリ及び蟻は移動速度が速く体長が小さいため、より接写の行えるレンズを使用し、取り込み速度を 720 コマ/秒及び 960 コマ/秒とした。倍率は各供試体に合わせて設定を行った。

^{*1} 平成13年度電子システム工学専攻科卒業生
(現九州工業大学大学院)

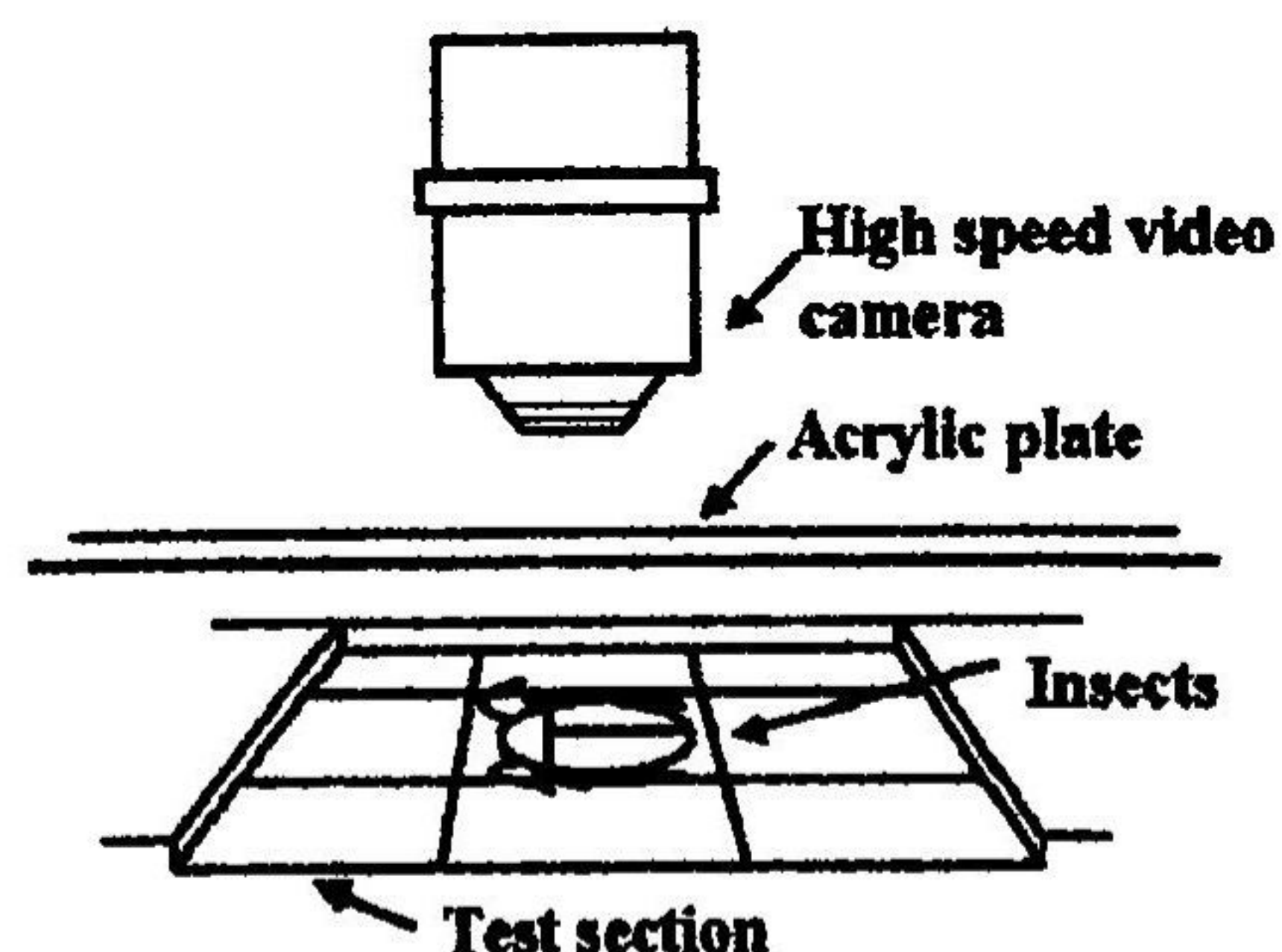


Fig.1 Experimental system

3. 解析装置及び方法

Fig.2 に動画像解析装置を示す。ハイスピードビデオカメラで撮影した映像をビデオテープレコーダで録画し、その映像をパーソナルコンピュータのイメージ解析ボード(ライブラリ、ひまわり 55)に取り込み、画像処理ソフト「Easy32」を用いて連続した静止画を作成し、動画像解析ソフト「Move Tr32」を用いてターゲットの解析を行った。

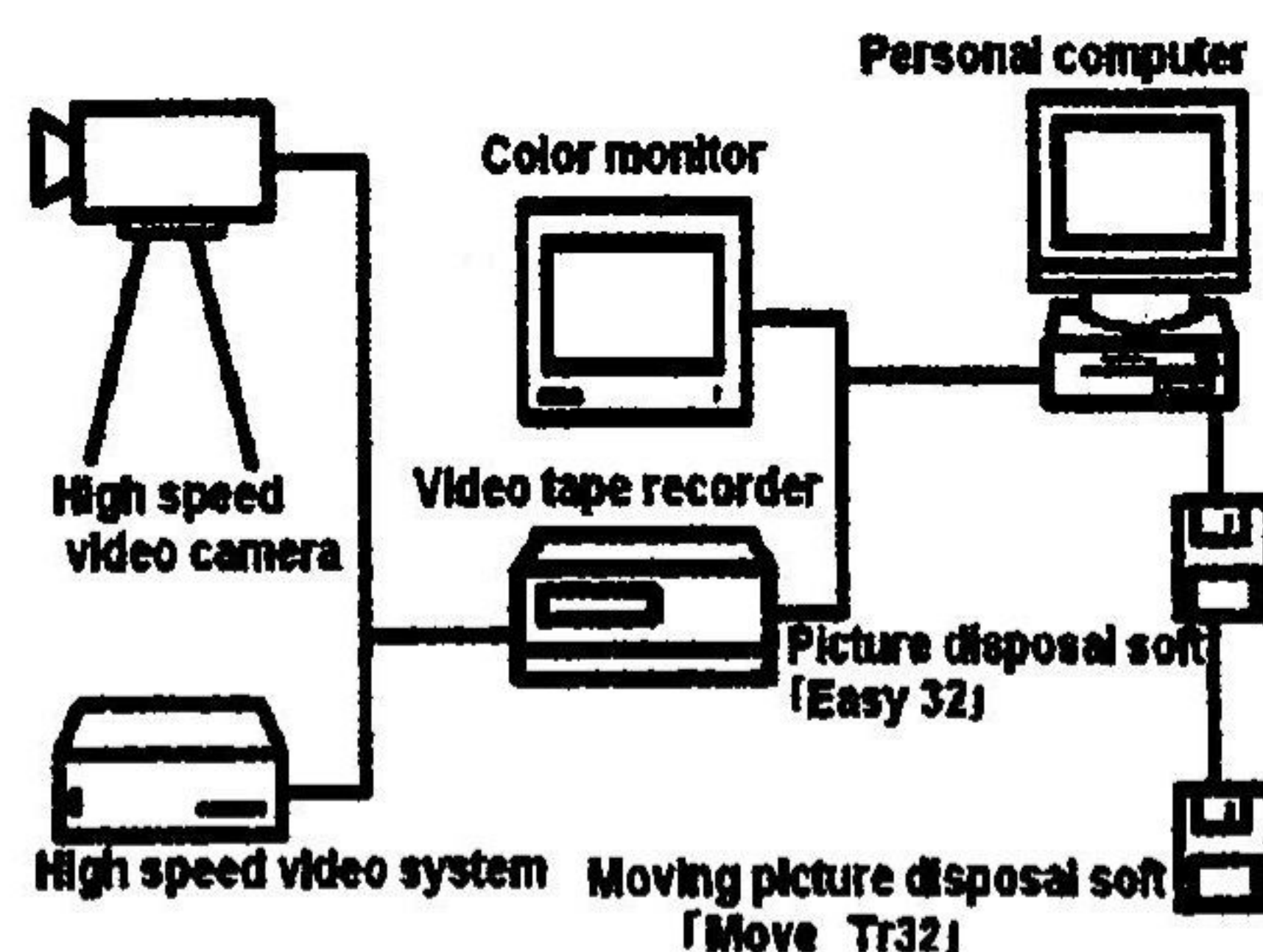


Fig.2 Analysis system

3. 1 足の運びの解析

各足をターゲットとして動画像解析を行い、昆

虫が足を動かす順番を調べた。

3. 2 速度の解析

供試体の頭部先端をターゲットとして動画像解析を行い、解析した移動速度からその平均値を算出した。

3. 3 周波数の解析

いずれかの足が移動面よりはなれた瞬間からそれ以外の足がすべて動き終わり、再び同じ足が動き出すまでを1周期として、その間のフレーム枚数と取り込み速度により周期を算出し、その値を用いて6本すべての足が1秒間に何回動いているかという周波数を次式により算出した。

$$6 \text{ 本すべて足を動かす周波数} : 1 / T \times 6$$

ここに、 $T[s]$: 周期

3. 4 歩幅の解析

各足の先端をターゲットとして動画像解析を行い、その足が移動面を離れてから接地するまでの変位を解析した。

3. 5 接地率の解析

連続した静止画像を用い、移動時において何本の足を移動面に接地させているかという割合を、1周期のフレーム枚数と各接地時のフレーム枚数の比率を次式により算出し、接地率とした。

$$\text{接地率}[\%] : \Delta t / T \times 100$$

ここに、 $T[s]$: 昆虫の前進における1周期あたりの時間

Δt : 移動面に対するn本足での接地時間

3. 6 各足の節の角度変化の比較

連続した静止画像を用い、各足が移動面より離れた瞬間から接地するまでの第1節と第2節の角度変化を供試体上方から解析した。

4. 実験・解析の結果及び考察

4. 1 基礎データ

Table1 Insects' basic data

	Mega crania Batesii	Mantis	Cock roach	Ant	Dorcus	Rhombor rhina
Mass[g]	4.8	2.77	0.18	0.04	3.38	1.34
Length[mm]	99	88	15	11	59	27
Front Leg[mm]	82	56	8	11	32	18
Middle Leg[mm]	53	49	12	10	31	19
Back Leg[mm]	64	60	16	9	30	20

Table 1 に実験に供した昆虫の基礎データを示す。

4. 2 足の運び・速度

ゴキブリ、蟻、カナブン、クワガタはいずれの

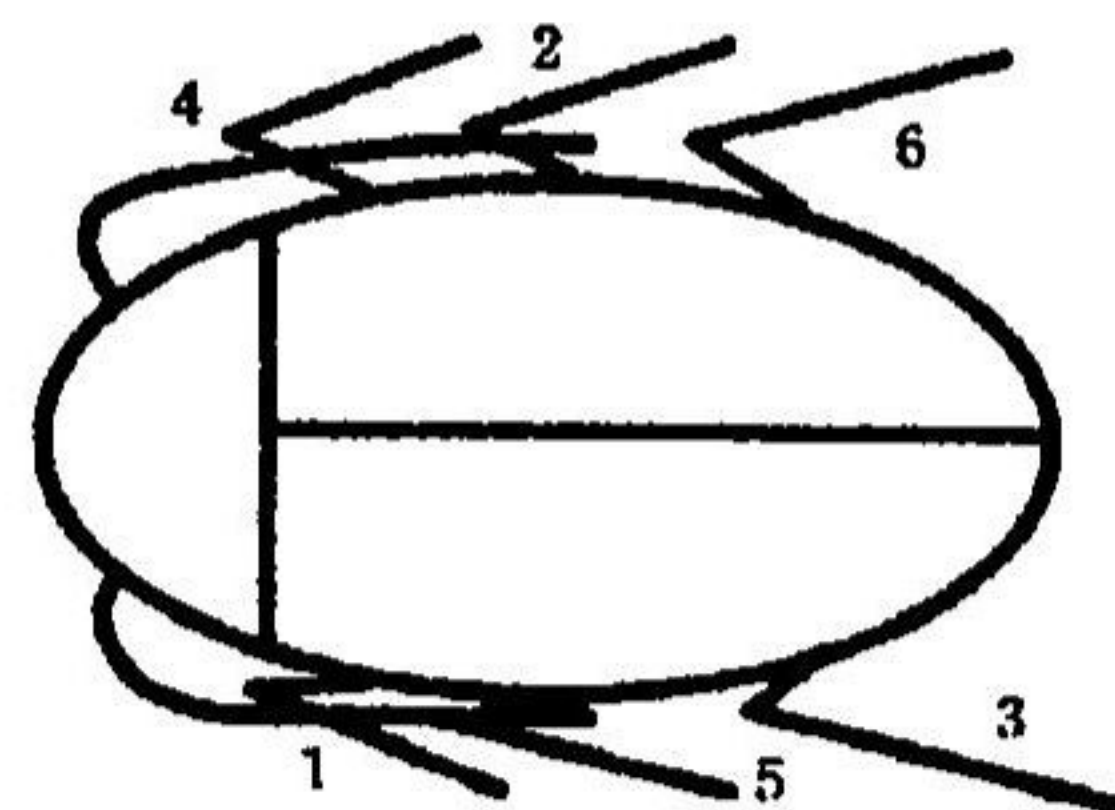


Fig.3 Order of leg's movement of cockroach

移動においても同様のパターンであり、片側の中足をぬかした前足及び後足とその反対側の中足をほぼ同時に動かし、それらを左右交互に行うことにより前進する交互3脚歩行という歩容形態を保持していることが確認できた。Fig.3 にその足運びの順序を数字で表したものを示す。また、蟻螂については移動開始後、その動きが一定になった時のみにゴキブリや蟻と同様のパターンを確認することができた。ナナフシにおいては、他の供試体のような規則性を見出すことはできなかったが、前後の隣り合った足が同時に動くことはなかった。また、クワガタは蟻、ゴキブリ、カナブンと同様に交互3脚歩行を行うが、後足の離地が遅いことが特徴として挙げられる。

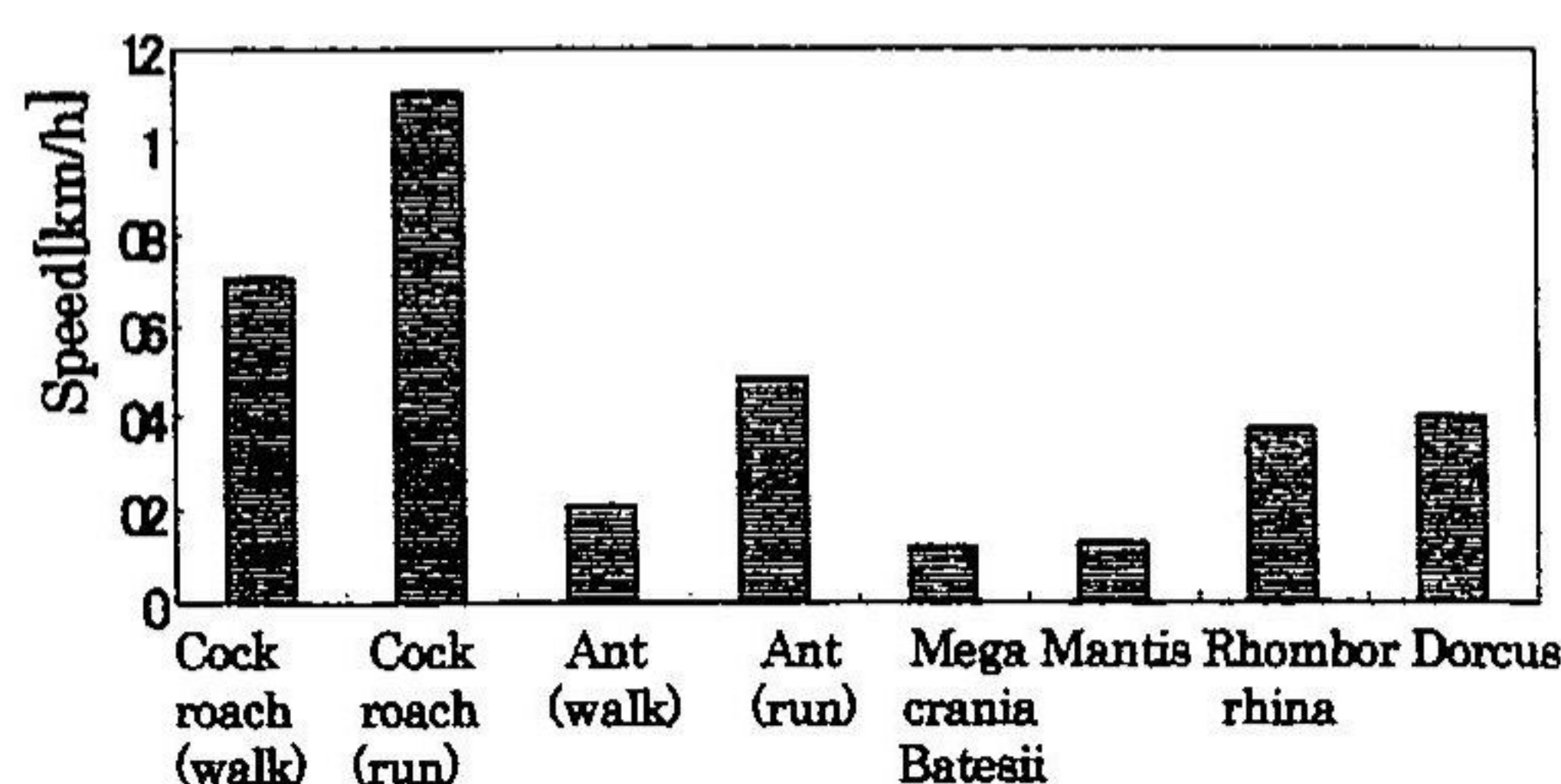


Fig.4 Moving speed

Fig.4 に各供試体の平均移動速度を示す。ナナフシ、蟻螂、カナブン、クワガタはどの移動においても速度がほぼ安定しており、1つの値に平均化することができた。しかしゴキブリと蟻の場合、移動速度は大きく2つに分類することができ、歩行と走行の違いではないかと考えられ、移動速度が大きく変化してもその足の運びの順序は変わることがなく交互3脚歩行であることがいえる。また、交互3脚歩行を行う昆虫はそうでない昆虫に

比べ、その移動速度が著しく大きいことが確認でき、交互3脚歩行という歩容形態は高速に前進するための1つの要因であると思われる。

解析により得られた速度の値を用いて各供試体が体長に比べどの程度の速度により前進移動を行っているのかを最も移動速度の遅かったナナフシの速度を1として、他の生物との比較を行った。その結果を Fig.5 に示す。

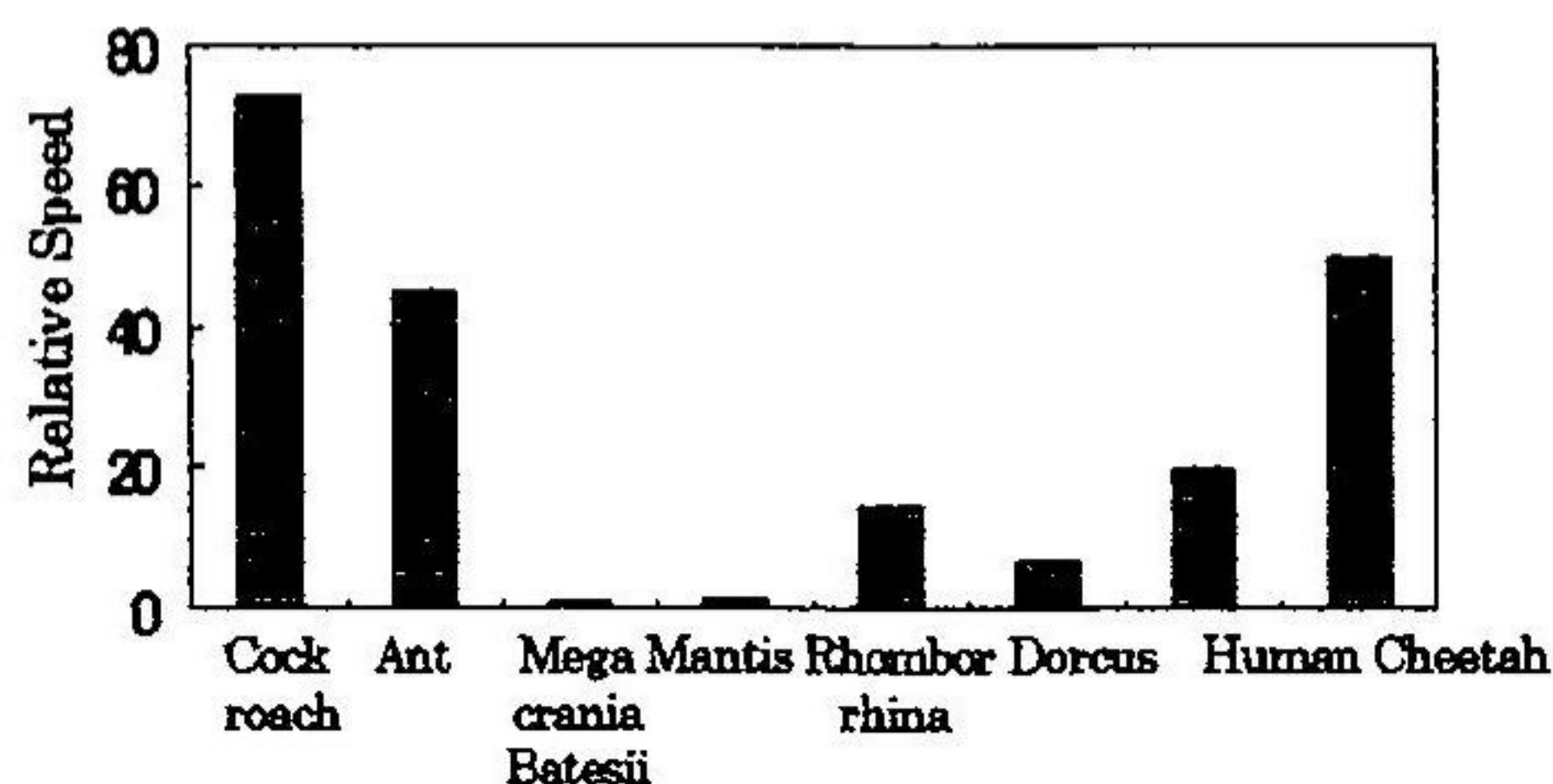


Fig.5 Relative speed(Megacrania Batesii 1)

このことより体長が同等であると考えれば、蟻はチーターとほぼ同等の速度であり、ゴキブリは100mを10秒で走る人間（スプリンター）に比べ3.5倍以上も速いことが分かる。

4. 3 歩幅・周波数

Fig.6, Fig.7 に各供試体の歩幅、周波数を平均化したものを示す。ゴキブリ及び蟻は移動の際の足を動かす周波数を大きく二つに分類することがで

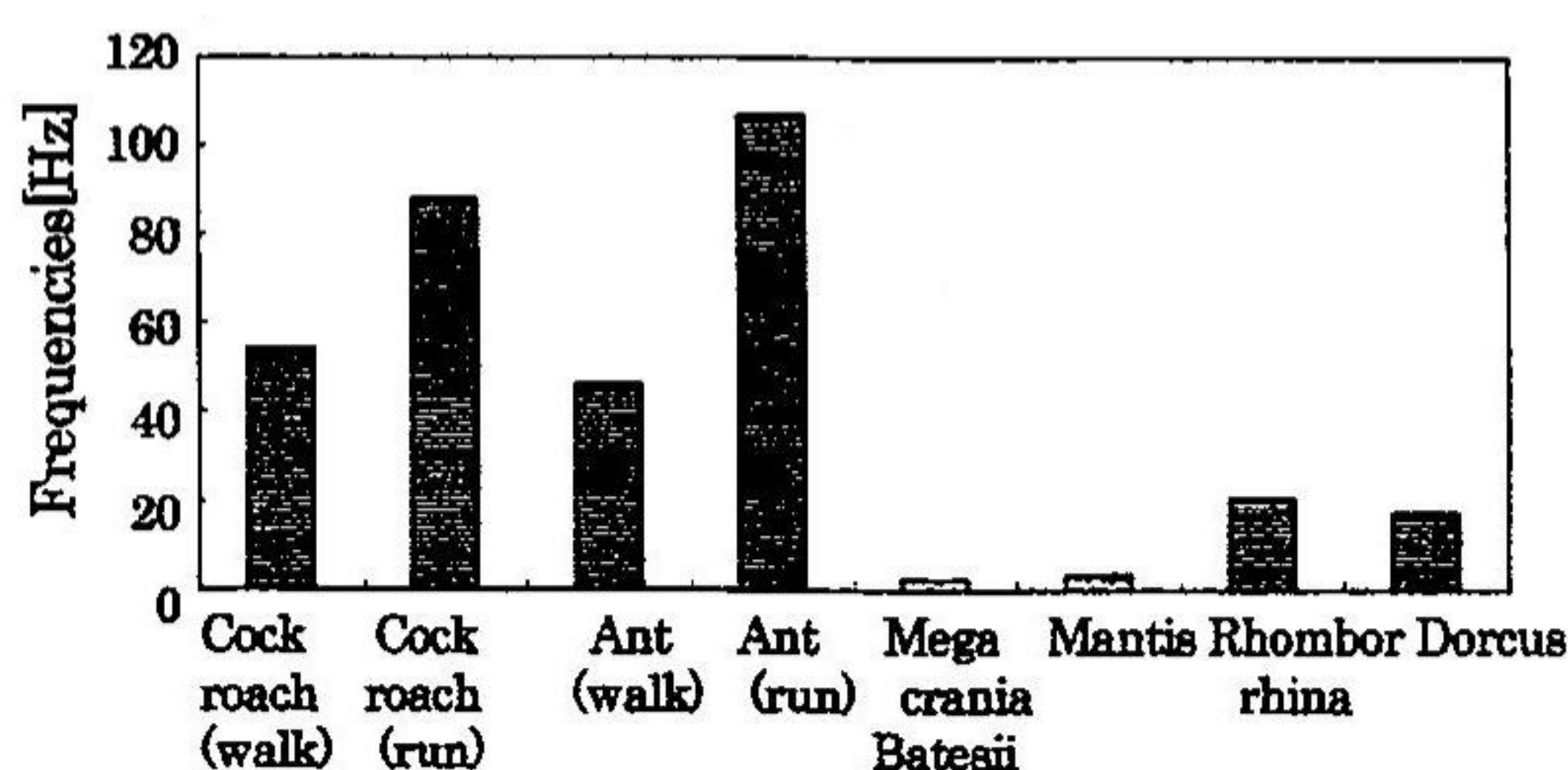


Fig.6 Frequencies

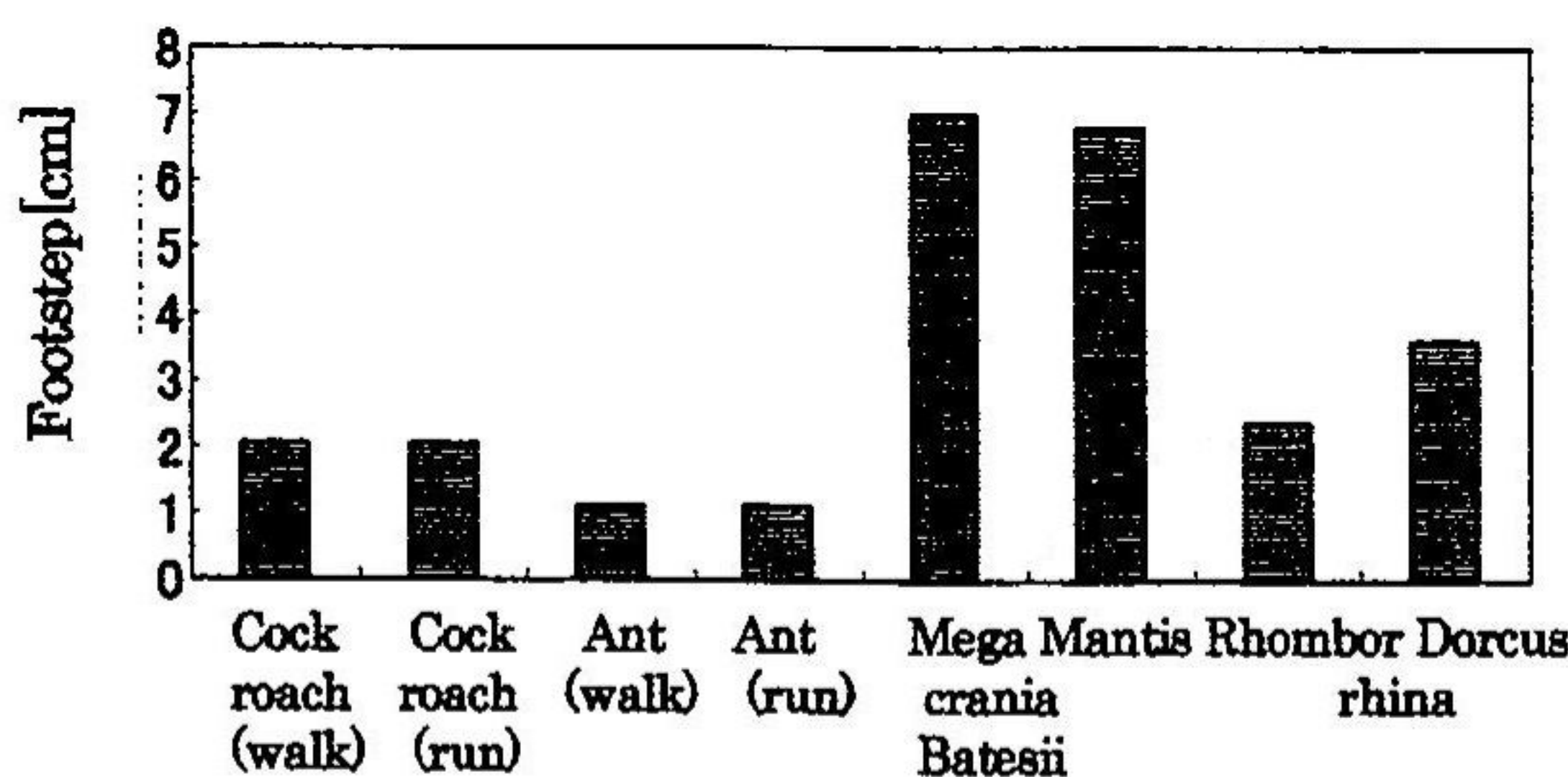


Fig.7 Footstep

きた。また蟻及びゴキブリと同様に交互3脚歩行を行うカナブンとクワガタにおいては、周波数は

20Hz程度とほぼ一定であり、蟻及びゴキブリに比べ著しく低いことが分かる。交互3脚歩行を行わないナナフシ、蟻の周波数は5Hz程度であり、交互3脚歩行を行う昆虫に比べその周波数は非常に低いことが分かる。

歩幅についてはどの供試体においても特に大きな変化は現れず一つの値に平均化することができた。これらのことより蟻及びゴキブリは移動速度を変化させる際、歩幅を変えるのではなく、周波数を変化させているということがいえる。

また各供試体の足の長さとの歩幅の関係を調べるために、それぞれの歩幅を足の長さで割った値を次式により求め Fig.8 に示す。

$$L' : L(\text{step}) / L(\text{leg})$$

ここに、 $L(\text{step})[\text{mm}]$: 歩幅 $L(\text{leg})[\text{mm}]$: 足の平均長さ

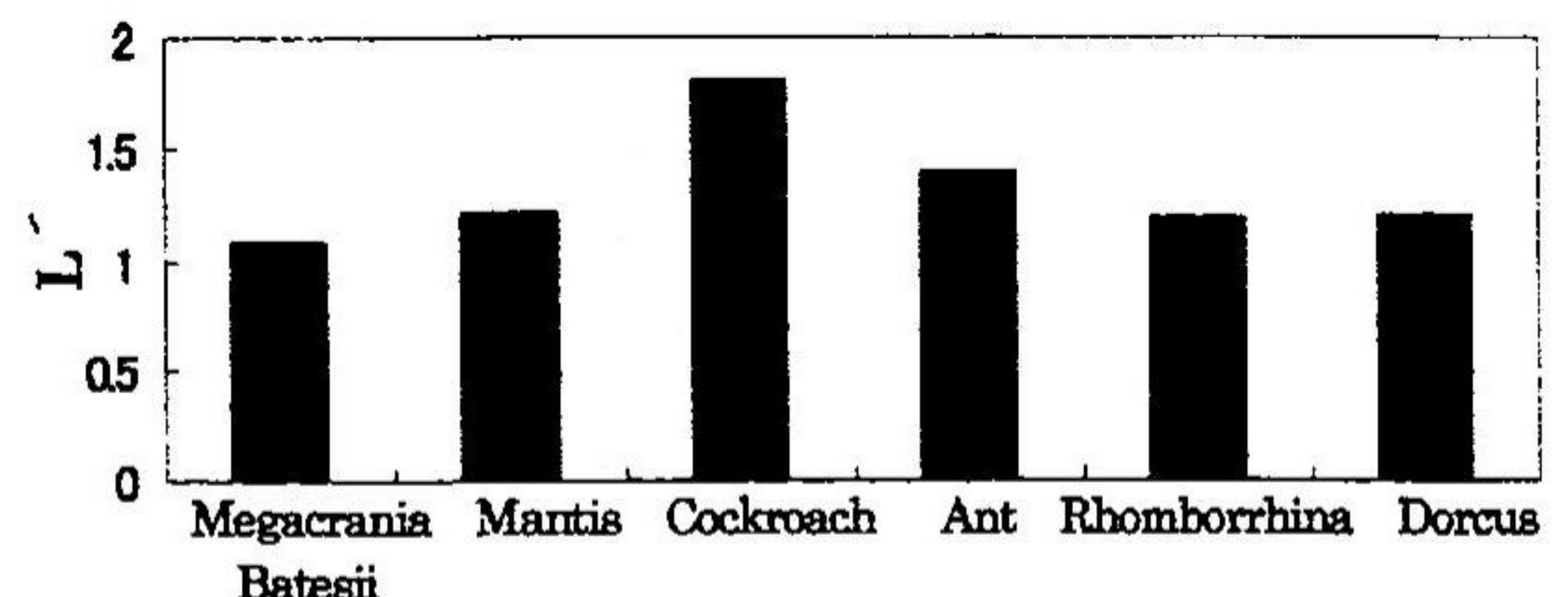


Fig.8 Relation between footstep and leg's length

その結果、体長に比べ移動速度が速いゴキブリはその足の長さに比べて比較的大きな歩幅により前進移動を行っているということがいえる。

4. 4 接地率

各供試体の平均接地率を Fig.9 に示す。ナナフシ及び蟻においては移動中に5本の足を接地させている割合が最も高く、70%程度であることが分かる。また4.2よりカナブン、クワガタ、蟻、ゴキブリは交互3脚歩行という歩容形態を有していることを述べたが、その接地率には大きな違いが現れた。ゴキブリ、蟻及びカナブンにおいては3本の足を接地させながら移動している割合が最も高く70%前後であることが分かる。しかしクワガタの接地率は他の交互3脚歩行を行う昆虫に比べ、移動中に4本の足を接地させている割合が20%前後、6本足での接地率も30%近くと比較的高い割合を示した。本来クワガタの歩容形態は地面を移動するためのものではなく、木や枝を登るときにその体を固定するためのものであると考えられ、

そのために他の昆虫に比べ6本、4本足での接地率が高くなっているのではないかと考えられる。

また蟻及びゴキブリの歩行時と走行時の接地率を比較すると、共に走行時における3本足での接地率が歩行時に比べ高いことが分かる。これらの結果と前述の4.3の結果より、蟻及びゴキブリは移動速度を変化させるためには単に周波数を高めるだけではなく、接地率も変化させているということがいえる。

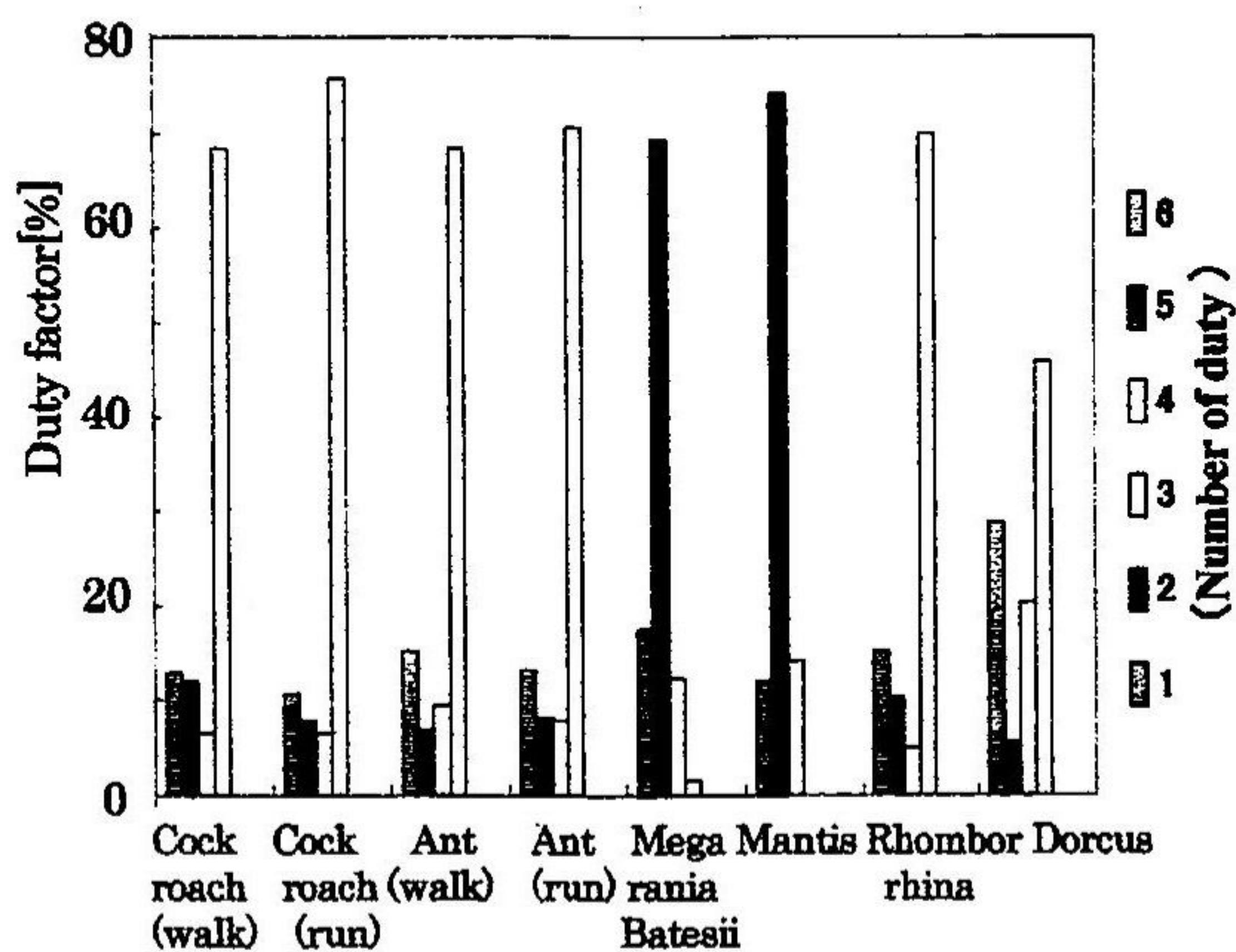


Fig.9 Duty Factor

4. 5 各足の節の角度変化の比較

Fig.10 に解析部位をモデル化したものを示す。

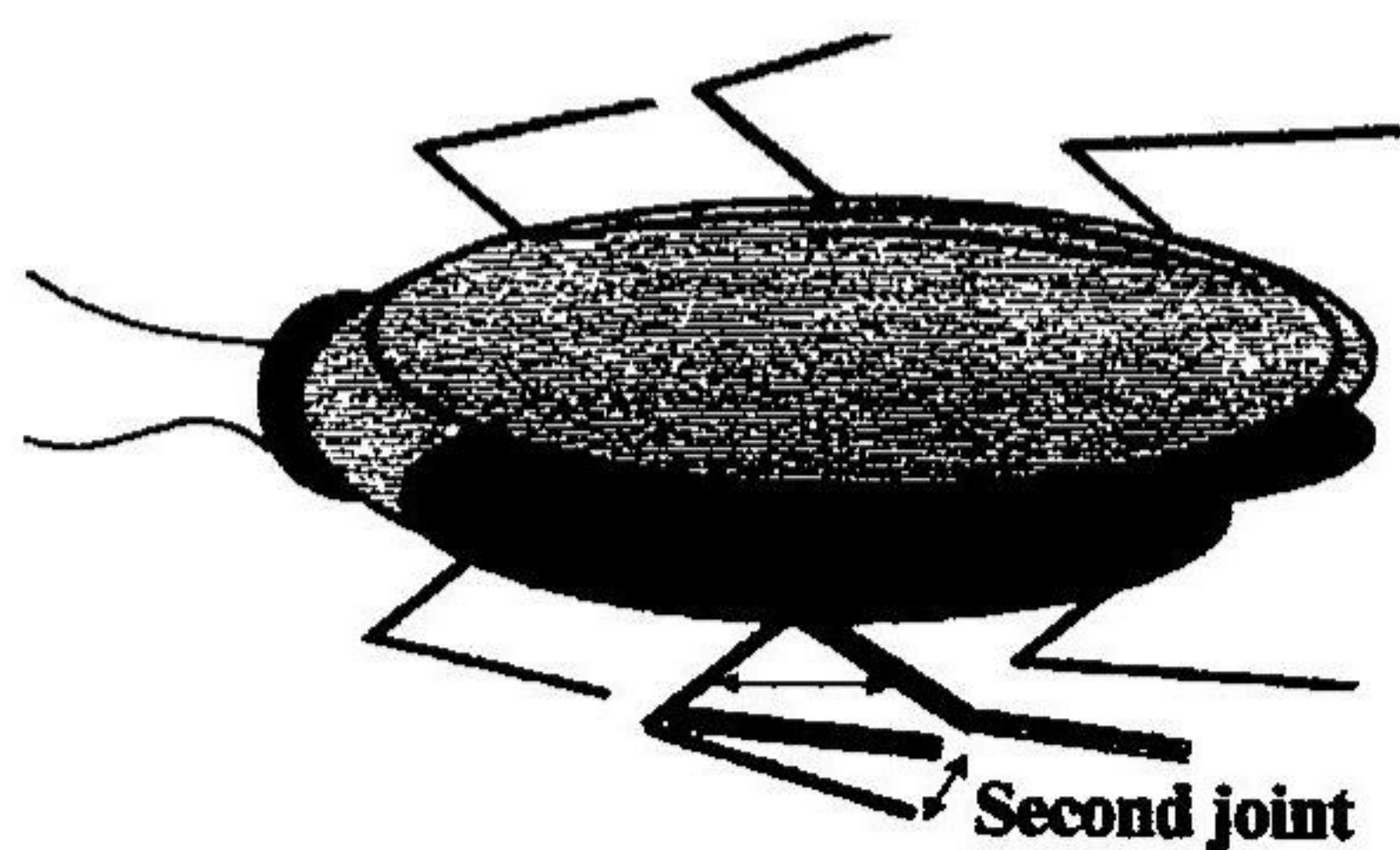


Fig.10 Test section

また Table2, Table3 に各足の第1節及び第2節の角度変化を、Table4 に第1節と第2節の角度変化の差を示す。昆虫の足の第1節と第2節は関節により接続されているため、第1節と第2節の角度変化に差が生じているということは、第1節の角度変化に加え第2節が独立した角度変化を行なっているか、または関節の回転による角度変化が生じていると考えられる。これらのことより蟻、ゴキブリ及びカナブンにおいては第1節と第2節の

角度変化の差がほとんどないことから主に胸部に最も近い第1節の角度変化により前進し、関節による節の回転も生じていないと思われる。また蟻及びゴキブリの歩行と走行による各節の角度変化の違いはほとんど見られなかった。クワガタにおいては後足の第1節と第2節の角度変化の差が、ナナフシ及び蠅螂においては前足の第1節と第2節の角度変化の差が大きく現れており、蟻、ゴキブリ及びカナブンはナナフシ、蠅螂及びクワ

Table2 Angle change of first joint

	Cockroach (walk)	Cockroach (run)	Ant (walk)	Ant (run)	Megacrania Batesii	Mantis rhina	Rhombor	Dorcus
Front Leg[mm]	40	45	45	45	10	5	40	40
Middle Leg[mm]	45	45	50	50	45	45	40	50
Back Leg[mm]	45	45	50	50	45	50	45	40

Table3 Angle change of second joint

	Cockroach (walk)	Cockroach (run)	Ant (walk)	Ant (run)	Megacrania Batesii	Mantis rhina	Rhombor	Dorcus
Front Leg[mm]	40	45	45	45	30	45	45	40
Middle Leg[mm]	45	40	50	50	60	60	40	40
Back Leg[mm]	45	45	45	50	45	30	40	0

Table4 Gap of angle change

	Cockroach (walk)	Cockroach (run)	Ant (walk)	Ant (run)	Megacrania Batesii	Mantis rhina	Rhombor	Dorcus
Front Leg[mm]	0	0	0	0	20	30	5	0
Middle Leg[mm]	0	5	0	0	15	15	0	10
Back Leg[mm]	0	0	5	0	0	20	5	40

ガタに比べ比較的単純な動作を繰り返すことにより前進していると考えられる。

5. 結言

本研究の範囲内で次のことが分かった。

- 1) ゴキブリ、蟻、カナブン、クワガタの前進移動時における足の動かす順序は常に同じであり、移動速度が変化しても変わることがない。
- 2) ゴキブリ、蟻の移動速度の変化（歩行と走行

昆虫の足の動きに関する研究

の違い)は歩幅によるものではなく、周波数の変化に大きく依存する。また歩行に比べ、走行のときの3本足での接地率も高くなり、重心を支えるのに必要最小限の足を接地させながら前進している割合が高くなる。

- 3) ナナフシ、蟪蛄、ゴキブリ、蟻、カナブン、クワガタの前進移動において、前後の隣り合った足が同時に動くことはない。
- 4) 交互3脚歩行を行う昆虫において接地率の違い及び前進移動の際の足の節の角度変化に違いがある。
- 5) ゴキブリ、蟻及びカナブンは主に胸部に最も近い第1節の角度変化により前進していると考えられる。
- 6) ナナフシ、蟪蛄及びクワガタは第1節及び第2節の角度変化、また関節による節の回転により前進していると考えられる。
- 7) ゴキブリ及び蟻がナナフシ、蟪蛄、カナブン、クワガタに比べ体長の割に高速に前進している理由の一つとして、
 - ・足を動かす周波数が非常に高い
 - ・交互三脚歩行という歩容形態を有しており、重心を支えるのに必要最小限である3本の足を接地させながら前進している
 - ・最も胸部に近い第1節の角度変化によって前進移動を行い、比較的単純な動作をくりかえし行うことにより前進している事が挙げられる。

参考文献

- 1) 越 裕幸, “昆虫の歩行解析とロボットのための歩容設計” 機講論集
- 2) 加藤, 菊地, “昆虫の足の動きに関する研究(第1報 接地率の比較)” 機講論集, No010-2, (2001), 205
- 3) 加藤, 菊地, “昆虫の足の動きに関する研究(第2報 各脚の角度変化の比較)” 関東学生会第41回公演集, (2002), 349

「受理年月日 2002年9月30日」

