

昆虫運動解析による歩行ロボットの運動パターン

三宅 和哉, 北村 岩雄, 山崎登志成
高橋 隆一, 稲垣 征司・池田 長康

1. ま え が き

近年, 送電の高電圧大容量化に伴い送電線が新しく建設されている。これにはまた, 建設後の保守, 点検などの作業を行う必要がある。これらの現場は, 山間地に多く存在するため, 資材を運ぶだけでも大変であり, 危険を伴うこともある。しかし, 新たな林道は山林の表面や水脈を切るため, 土砂崩れや森林の生態系を破壊する原因に成りかねない。従って, 林道によらない安全な作業用運搬, 輸送手段を考える必要がある。これには森林の中に住む甲殻類の昆虫を見れば, 道のない, 多少の傾斜地を歩行できる多足ロボットが最適であることが分かるであろう。この研究の多足ロボットは多関節, 多足を持つ歩行ロボットで, 関節を自由に動かし, 道のない多少の凸凹をもつ傾斜地を歩行でき, 送電線の保守, 点検などの作業を行うことができることを目標としている。

この多足ロボットを設計するにあたり, 運動の静止安定性を持たせるため, 足の本数は6とすることにした。次に, 6足歩行ロボットの簡単な動力を持たないモデルを製作し, その歩行形態と, 各足の干渉, 協調を観察, 考察をした。この結果, スムーズな歩行を実現するには, 各足の伸長方向, 各足の歩幅などが各足の干渉や協調に影響しており, しかも, これらの動きを各足のそれぞれの関節が制御しながら行わなければならないという数多くの問題があることが分かった。そのため, 森林に住む「カブトムシ」の歩行形態を観察し, この運動をもとにロボットの歩行運動パターンを決定しようと考えた。

2. 6足ロボットのモデル

我々は, 図1に示すような6足ロボットのモデルを考えた。このモデルの足は, 図2に示すように, 3節, 3関節より成り立っている。

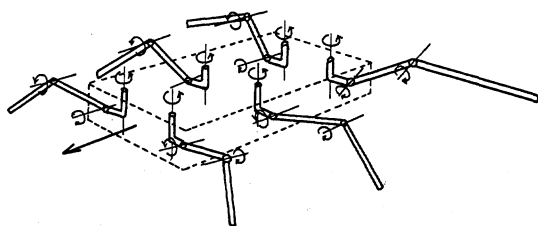


図1 ロボットのモデル

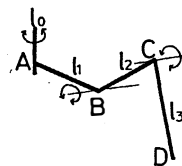


図2 足のモデル

2.1 6足の歩行の特徴

6足の歩行形態は、図3に示すように、足を地につけたまま体を前方に押し進める立脚相と、後方にある足を地面からはなして前に進める遊脚相の二つの相が一つのサイクルを成している。また、6足の各足を図4に示すように $R_f, R_m, R_r, L_f, L_m, L_r$ と定義すると、歩行は第一グループ (R_f, L_m, R_r) と、第二グループ (L_f, R_m, L_r) から成る三角形を交互に前方に押し出して歩行を行い、常に重心がその三角形の中に入り静的安定を保っている。

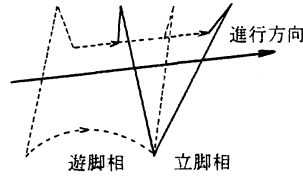


図3 立脚相と遊脚相

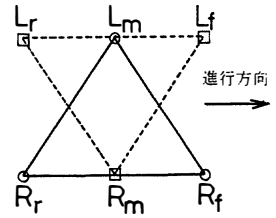


図4 歩行形態

2.2 足の運動の表現

足の運動を記述するには、各足の関節角度が既知である場合、足の先端及び、各関節位置を知ることができる順運動学の方法と、逆に、各足の先端及び各関節の位置からそれぞれの関節の角度を知る、逆運動学の方法とがある。

2.2.1 各関節の座標系

各関節の座標系を、次のa)～f)の設定項目に従い図5に示すように定める。

- 座標系は付け根から足先に向かって $i=0\sim3$ とする。
- 0番目の座標系を基準座標系とし、その Z_0 軸が付け根のジョイントの可動軸に沿っていれば付け根のどこに設定してもよい。
- Z 軸は各ジョイントの可動軸に沿う方向に設定する。
- X 軸は Z 軸に垂直で、出来る限り足先の方に設定する。
- Y 軸は先の X 軸、 Z 軸に対して右手系をなすように設定する。
- 3番目(最終)の座標系は足先のどこに設定してもよいが、 X_3 軸が Z_2 軸に対して垂直でなければならない。

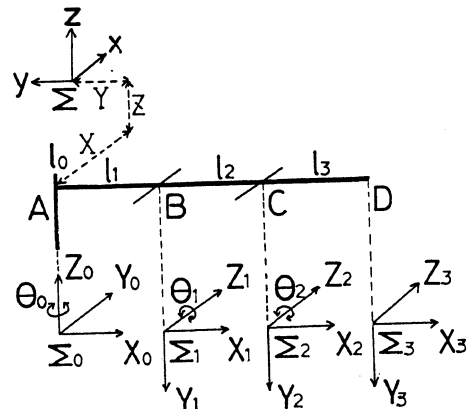


図5 各関節の座標系

2.2.2 歩行運動の行列表現—順運動学的解析

この歩行運動行列表現には、異なる二つの座標系間の空間的な回転関係を表現する 3×3 回転変換行列と、平行移動ベクトル及び座標系の大きさの要素を加えた、(1)式に示す 4×4 同次座標変換行列 (T) を利用する。この同次座標変換行列は、2つの座標系 Σ_{n-1} 、 Σ_n があるとき、 Σ_n を Σ_{n-1} に関係づける働きがあり、これを ${}^{n-1}T_n$ と表す。この同次座標変換行列を各関節について求め、それら

を合成することにより、各関節の幾何学的な位置と姿勢を表す局所的座標系が、すべて足の付け根にある基準座標系 Σ_0 上に変換できる。そこで、図5の各関節に設定した座標系 ($\Sigma_1, \Sigma_2, \Sigma_3$) を基準座標系 Σ_0 に関係づける基本同次座標変換行列を(2)式～(4)式に示す。

$$T = \begin{pmatrix} \text{rotation} & \text{position} \\ \text{matrix (3} \times \text{3)} & \text{vector (3} \times \text{1)} \\ \text{perspective} & \text{scaling} \\ \text{transformation} & \text{factor} \end{pmatrix} \dots\dots (1)$$

$${}^0T_1 = \begin{pmatrix} C_0 & 0 & -S_0 & l_1 C_0 \\ S_0 & 0 & C_0 & l_1 S_0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad {}^0T_2 = {}^0T_1 * {}^1T_2 = \begin{pmatrix} C_0 C_1 & -C_0 S_1 & -S_0 & l_0 C_0 + l_2 C_0 C_1 \\ S_0 C_1 & -S_0 S_1 & 0 & l_1 S_0 + l_2 S_0 C_1 \\ -S_1 & -C_1 & 0 & -l_2 S_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \dots\dots (2) \quad \dots\dots (3)$$

$${}^0T_3 = {}^0T_2 * {}^2T_3 = \begin{pmatrix} C_0 C_1 C_2 - C_0 S_1 S_2, & -C_0 C_1 S_2 - C_0 S_1 C_2, & -S_0, & l_1 C_0 + l_2 C_0 C_1 + l_3 (C_0 C_1 C_2 - C_0 S_1 S_2) \\ S_0 C_1 C_2 - S_0 S_1 S_2, & -S_0 C_1 S_2 - S_0 S_1 C_2, & C_0, & l_1 S_0 + l_2 S_0 C_1 + l_3 (S_0 C_1 C_2 - S_0 S_1 S_2) \\ -S_1 C_2 - C_1 S_2, & S_1 S_2 - C_1 C_2, & C_0, & -l_2 S_1 - l_3 (S_1 C_2 + C_1 S_2) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \dots\dots (4)$$

ここで S_i , C_i , l_i は, $S_i = \sin \theta_i$, $C_i = \cos \theta_i$, l_i : リンク長さ ($i=0, 1, 2, 3$) である。これら、一本の足についての基本同次座標変換行列を、6足のロボットに拡張するために、付け根に設定した足の基準座標系 Σ_0 を、ロボット全体の基準になる絶対座標系 Σ 上に変換をする。これは図5のような基準座標系 Σ_0 と絶対座標系 Σ の関係があるとすると、(2)～(4)式の 3×1 position vector の部分に絶対座標系 Σ から見た、足の付け根にある基準座標系 Σ_0 の原点の位置 (X , Y , Z) を加えることになる。つまり基準となる原点を絶対座標系の原点に平行移動させることになる。これをそれぞれの足の付け根に対して行えば、すべての足の動きを絶対座標系上に変換して考えられることになる。

2.2.3 逆運動学的解析

図5に示すモデルについて、各関節の幾何学的な位置関係から、(5)式～(7)式に示す各関節角度 (θ_0 , θ_1 , θ_2) を表現する関係式を求める。この関係式に各関節の位置 (X_i, Y_i, Z_i) ($i=0 \sim 3$) の時間変化を与えることにより、関節角度の時間変化を求めることができる。

1) 第一関節角度 θ_0 の導出 ($-180^\circ \leq \theta_0 \leq 0^\circ$)

i) $X_2 > X_1$

ii) $X_2 < X_1$

$$\theta_0 = -\left| \tan^{-1} \frac{Y_0 - Y_1}{X_1 - X_0} \right| \quad \theta_0 = -\left| \pi - \tan^{-1} \frac{Y_0 - Y_1}{X_1 - X_0} \right|$$

iii) $X_2 = X_1$

$$\theta_0 = -90^\circ \quad \dots\dots (5)$$

II) 第二関節角度 θ_1 の導出 ($-90^\circ \leq \theta_1 \leq 90^\circ$)

$$\theta_1 = \tan^{-1} \frac{Z_0 - Z_2}{\sqrt{(X_2 - X_0)^2 + (Y_2 - Y_0)^2} - l_1} \quad \dots (6)$$

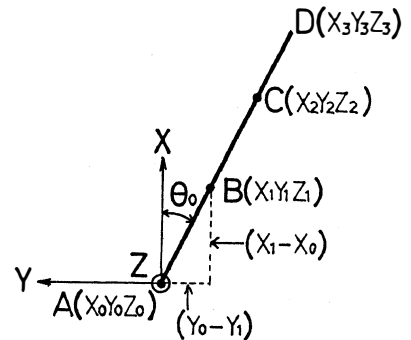


図6 θ_0 の導出

III) 第三関節角度 θ_2 の導出 ($0^\circ \leq \theta_2 \leq 180^\circ$)

i) $\theta_1 < 0$

$$\theta_2 = |\theta_1| + \left| \tan^{-1} \frac{Z_2 - Z_3}{\sqrt{(X_2 - X_3)^2 + (Y_2 - Y_3)^2}} \right|$$

ii) $\theta_1 \geq 0$

$$\theta_2 = |90 - \theta_1| + \left| \tan^{-1} \frac{\sqrt{(X_2 - X_3)^2 + (Y_2 - Y_3)^2}}{Z_2 - Z_3} \right| \quad \dots\dots\dots (7)$$

以上(5)式~(7)式は1本の足についてのものだが、他の足についても同じ式で表される。足を動かすためには、各関節角度の時間変化を知り、この角度変化を(2)式~(4)式に与え、各関節及び足先の位置の時間変化を求める必要がある。しかし、協調した運動をさせなければ各足の干渉などの問題が起こる。我々は、如何に運動させればよいかの知識をもっていないため、まずカブトムシの運動を調べ、これを1周期にわたりパターン化し、各足の運動を決定する。これをもとに、逆運動学を利用して各足、各関節角度の時間変化を導き、この値を用いて各足を運動させれば、各足は干渉せず、スムーズなパターン化した動きをするはずである。このため我々はカブトムシの歩行を詳細に調べた。

3. 昆虫の歩行の観測

3.1 測定装置と測定方法

図7に示すようなアクリル板を用いたチャンネルにカブトムシを入れて歩かせ、側方からビデオカメラにより撮影する。この歩行は縦方向(X, Z)運動はそのまま横から測定し、平面方向(X, Y)運動は下面に45°に置いた鏡で横方向に変え両方向同時に測定している。この実験では図8に示すように、各関節を $L_1 \sim L_{12}$ (左側), $R_1 \sim R_{12}$ (右側) のように定義し、基準となる座標系は進行方向をX軸、体の上方をZ軸、そしてY軸を正規直交座標系をなすよう横方向に設定する。長さの測定にはアクリル板のチャンネルに引いてある5mm方眼の1マスを単位とし、時間は1/30秒を1stepとした。原点は任意の位置に設定し、各関節について、各時間の座標成分を測定した。ここで横方向からの像では体の反対側のZ成分については測定することができないが、左側と右側は1/2周期で等しい動きをすると仮定した。

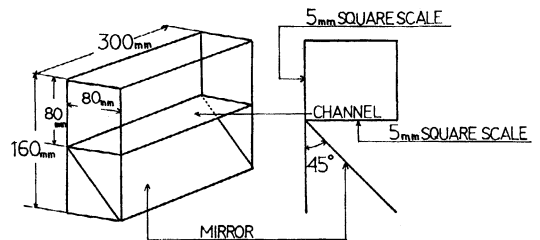


図7 測定装置

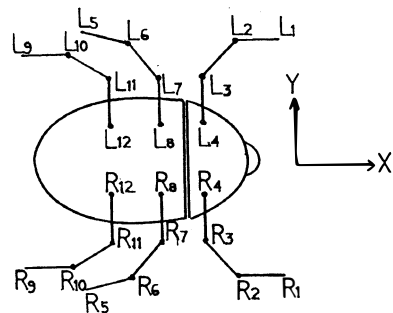


図8 各関節の定義

3.2 測定結果と補正

カブトムシの運動の測定結果の一例として右前足

R 2, R 3, R 4 の各関節それぞれの X 方向, Y 方向, Z 方向の測定値を図 9 a) から同図 h) の各図に実線で示す。カブトムシは、その運動が機械ほど一定したものではなく、直線状に歩いていないため、足の運びは必ずしも周期的ではない。したがって運動解析するために、カブトムシが直線歩いた場合の値に、補正をする必要がある。この補正は、カブトムシの頭の位置を中心のライン上に戻し、傾いている体の中心線をこのラインに合わせるように、 θ だけ回転させた。各足の各位置の X 座標の補正には $\cos \theta$ を掛け、Y 座標にも $\sin \theta$ を掛けることにより行った。その結果を図 9 の各グラフに破線で示す。図 9 のグラフは、縦軸を測定装置の 5 mm 方眼の一マス为单位長とし、横軸の 1 step は 1/30 秒としてある。X 方向のスケールに対して Y, Z 方向のスケールは 2 倍に拡大してある。同図 a), b), c) より足先の R 2 に比べ、R 3, R 4 と足の付け根に近づくほど、遊脚相と立脚相の運動の変化が小さくなるのが分かる。また Y, Z については X の値に比べてその変化はとても小さい。

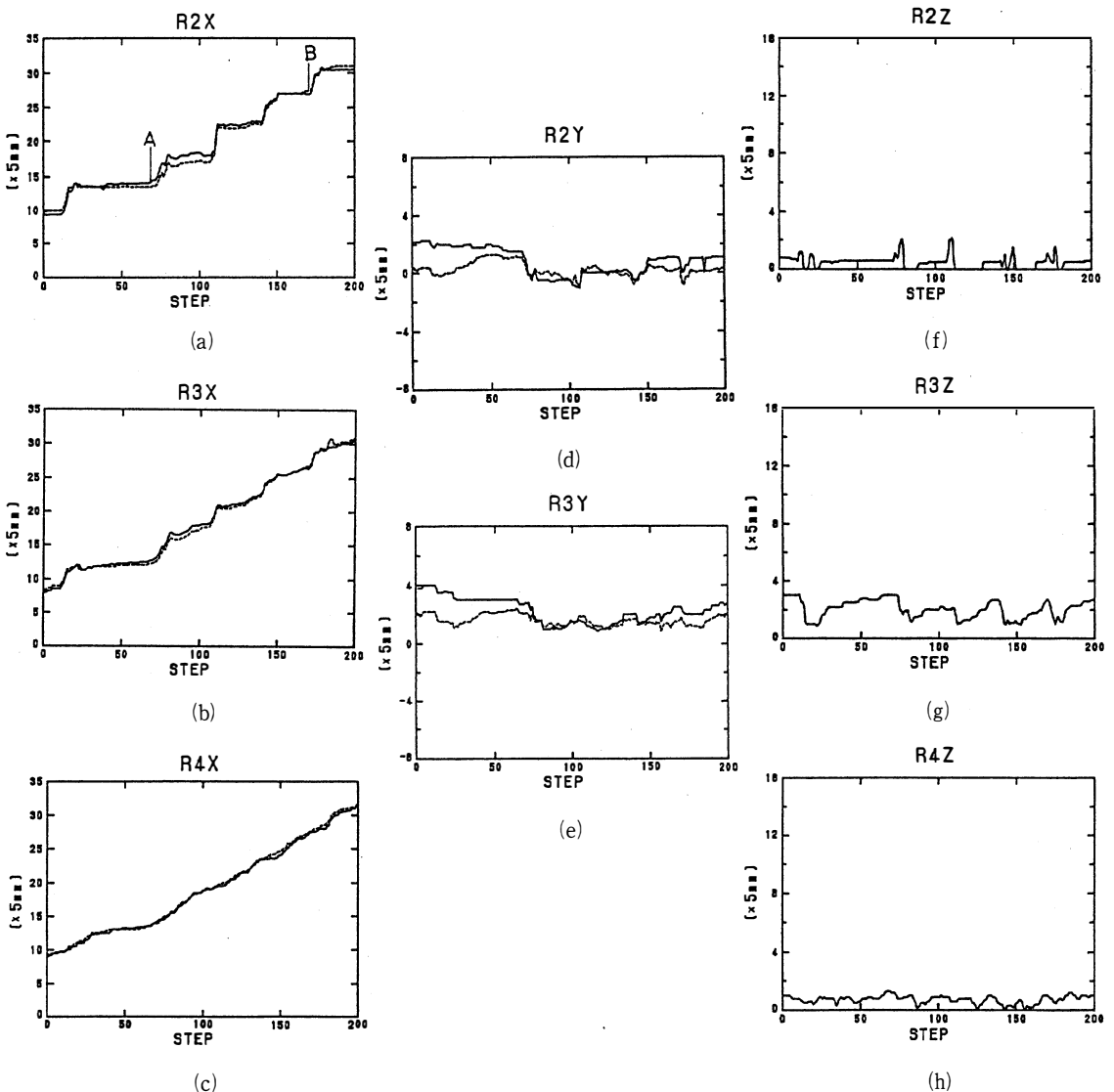


図 9 測定結果と補正結果

4. 歩行のパターン化

4.1 無次元化

各足の運動について、時間に関しての基準値に1周期をとり、変位置に関しての基準値に1周期に進む周期変位置をとり、それに対する比で表し、次のⅠ)～Ⅳ)の過程に従い無次元化した。また測定結果の無次元化をするにあたり次のa), b)の条件を考慮する。

- a) 考えているロボットには、手首や足先の機能を考慮していないので、手首や足先に相当する部分は、ひとつ内側の各関節(手首、かかとに相当)R 2, R 6, R10, L 2, L 6, L10の動きにはば追従しているだけなので無視し、各関節R 2, R 6, R10, L 2, L 6, L10を足先とする。
- b) 足の付け根にあたる各関節(R 4, R 8, R12, L 4, L 8, L12)のY, Z値については、一定の位置を進んだものとする。

Ⅰ) 1周期の時間と周期変位置

図9 a)に示すA, B間について平均し、1周期の時間とその間に進む周期変位置を求めると、1周期 1.1秒, 周期変位置 19mmとなる。

Ⅱ) 1周期内の遊脚相時間(M)と立脚相時間(S)の割合

1周期に対する各足先の遊脚相と立脚相の時間の割合を求めると、

$$R 2 X M : S = 0.21 : 0.79 \quad R 6 X M : S = 0.22 : 0.78 \quad L 6 X M : S = 0.22 : 0.78$$

$$L 2 X M : S = 0.21 : 0.79 \quad R10 X M : S = 0.22 : 0.78 \quad L10 X M : S = 0.22 : 0.78$$

となる。これにより、すべての足先について遊脚相と立脚相の時間の割合は0.20, 0.80となる。

Ⅲ) 各関節での周期変位置

Ⅰ)と同様にして各関節の周期変位置を求める。この結果を表1に示す。括弧内の数字は、X値は、プラスの値では付け根を基準にしてその他の各関節が前にあり、マイナスの値では後ろにあることを示す。Y値は、各関節が付け根に最接近する位置を示し、Z値は、各関節の最下位置を示す。R 4, 8, 12の関節は付け根にあたり体と共に変位するため、1周期は等しく、19mm進む。

Ⅳ) 周期変位置の無次元化

周期変位置 19mmを基準値として各関節の周期変位置に対し無次元化を行う。この結果を表2に示す。Yの最低値については、各足の付け根が0のライン上を進んだと考え、各関節が付け根からどれだけの距離に位置するかを示すようにした。R 4, 8, 12のX値については1周期内に基準値と同じだけ進むとした。

表1 平均変位置

単位(mm)

	X値	Y値	Z値
R 2	19(+3)	-4.5(+1)	8(0)
R 3	15(+1)	-3(+8.6)	7(+6.5)
R 4	(0)	+(+20)	0(+4)
R 6	19.5(-9)	-4(+5)	8(+0)
R 7	16(-6)	-3(+8.5)	4(+5)
R 8	(0)	0(+20)	0(+5)
R10	18.5(-17.5)	-4(+3.5)	1(+0)
R11	15(-9.5)	-3(+10)	1.5(+5)
R12	(0)	0(+20)	0(+4.5)

表2 無次元化値

	X値	Y値	Z値
R 2	1(+0.2)	-0.24(-1)	0.42(0)
R 3	0.8(+0.1)	-0.15(-0.6)	0.37(+0.34)
R 4	(0)	0(0)	0(+0.2)
R 6	1(-0.5)	-0.21(-1)	0.42(0)
R 7	0.8(-0.3)	-0.15(-0.6)	0.21(+0.26)
R 8	(0)	0(0)	0(+0.26)
R10	1(-0.9)	-0.21(-0.9)	0.05(0)
R11	0.8(-0.5)	-0.15(-0.5)	0.08(+0.26)
R12	(0)	0(0)	0(+0.23)

無次元化の結果をもとに、右前足についてパターン化した運動の1周期のみの結果を図10 a), b), c) に示す。横軸に無次元化した1周期をとり、縦軸にX, Y, Zそれぞれ無次元化した値を記している。測定結果と比較して、同様にして足の付け根に近づくほどその変化が小さくなっていることが分かる。

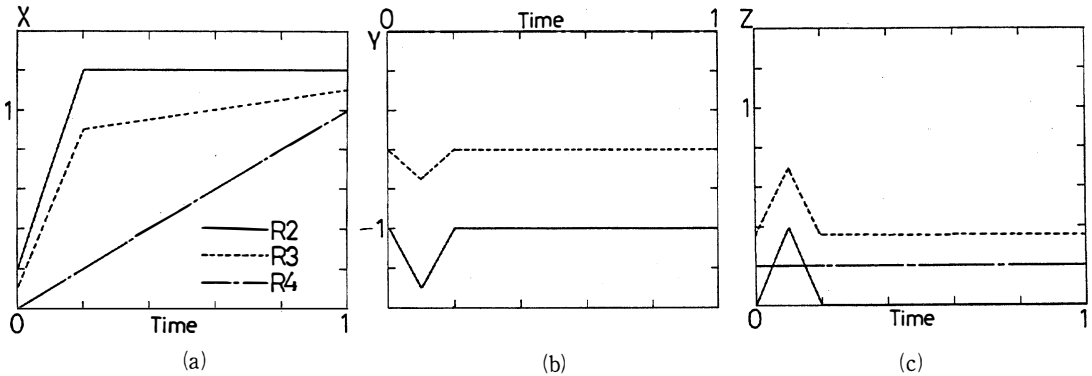


図10 パターン化グラフ

5. 歩行運動の解析

5.1 歩行運動の各関節角度

歩行パターンを利用し、逆運動学の考えを用いて関節角度の時間変化をもとめる。カブトムシの足の付け根は図11に示すユニバーサルジョイントの形になっているが、図2のモデルに対応させるため、リンク l_1 に相当する部分を仮想的に設定し、カブトムシの足の付け根をA, B 2つの関節に分けた。ただし l_1 は l_2, l_3 に比べかなり短い。各足の付け根 R 4, R 8, R 12を関節Bに対応させ、関節Aは、(8)式に示す関係式により表す。このモデルについて逆運動学の関係式、(5)式~(7)式に、図10に示すパターン化された関節位置の時間変化を与えることにより、図12 a), b), c) に示す関節角度の時間変化を導いた。図12の結果により6足ロボットの歩行パターンを導くことができた。

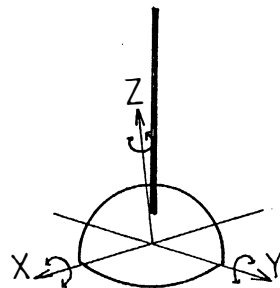


図11 ユニバーサルジョイント

$$A_x = B_x + \frac{l_1}{l_2}(B_x - C_x) \quad A_y = B_y + \frac{l_1}{l_2}(B_y - C_y) \quad A_z = B_z \quad \dots\dots\dots (8)$$

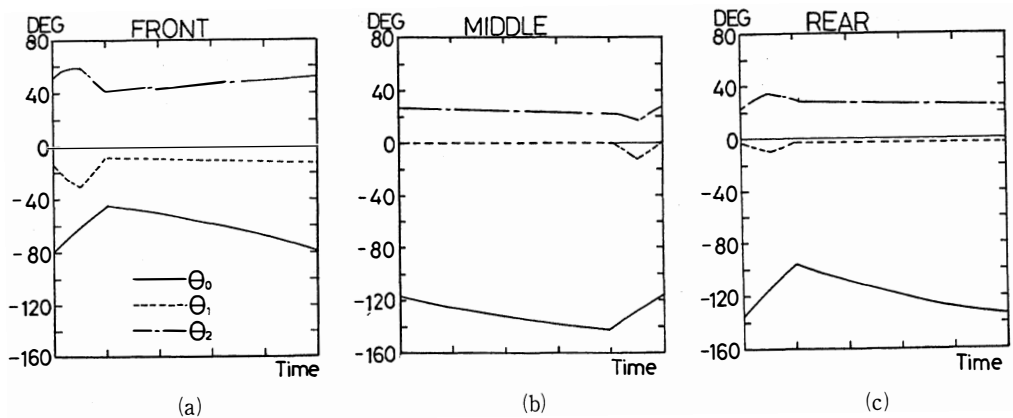


図12 関節角度の時間変化

5.2 歩行の特徴

関節角度の時間変化をもとに次に挙げる特徴があることが分かった。

- 1) 前足は、足全体を盛んに動かし、足を前方に伸縮させて体を引っ張っているのと、前方の地形を探るようにしていると考えられる。
- 2) 中足は、関節Cの角度 θ_2 の遊脚相時間の変化が前、後足に比べて逆になっているので、足を伸縮させて、体に足を近づけたり遠ざけたりしているのではなく、ほぼ足を延ばしたような状態で、前後に動かしていると考えられる。
- 3) 後足はその動きは小さいが、体に対し後方に伸縮させて体を押し進めているような状態になっている。

6. ま と め

- i) 6足歩行運動の各足、各関節について順運動学的行列表現を行い、逆運動学的解析も行った。
- ii) カブトムシの歩行を詳細に観測し、各足、各関節の動きの特徴を把握した。この特徴は前足で体を引っ張り、中足は単純に前後に動かし、後足は体を押し進めるような歩行である。
- iii) このカブトムシの運動をもとに各関節の動きを無次元化し、6足ロボットの歩行ロボットの歩行に関するパターンを得た。
- iv) 以上の解析から、6足ロボットの平地のみならず、傾斜地での運動に関するパターンを検討し、決定して行くことが可能である。また、トルクの時間変化を求めることや、フィードバック制御系を構成することが可能であると考えられる。

参 考 文 献

- 1) Fu, Gonzalez, Lee: ROBOTICS, 12~81, MCGRAW-HILL INTERNATIONAL EDITIONS, 1987
- 2) 広瀬茂男著: ロボット工学—機械システムのベクトル解析—, 1~15, 裳華房, 1987
- 3) 中野栄二著: ロボット工学入門, 124~139, オーム社, 1983 電気学会, 1992年10月2日

Walking pattern of a multiped robot by analyzing the movement of an insect

Kazuya Miyake, Iwao Kitamura, Tosinari Yamazaki,
Takakazu Takahashi, Seiji Inagaki, Nagayasu Ikeda

The method of a determination of walking pattern of a multiped robot with six legs was considered. The three processes: 1) Matrix expression of the walking on the base of kinematics. 2) Observation of the movement of insects. 3) making of the walking pattern of a multiped robot, were carried. The characteristic and the time dependence of motion of each leg of the insect were analyzed and the non-dimension walking patterns were determined from these processes. It is found as the fundamental characteristic of the multipede (6 legs) robot walking that the functions of front legs, middle legs and rear legs are to pull the body ahead, to support it and to push it respectively.

〔英文和訳〕

昆虫運動解析による歩行ロボットの運動パターン

三宅 和哉, 北村 岩雄, 山崎登志成
高橋 隆一, 稲垣 征司, 池田 長康

6足の多足ロボットの歩行パターンの決定方法について考察を行った。この考察は、3つの手順で行った。1) 運動学に基づく歩行の行列表現。2) 昆虫の運動の観測。3) 多足ロボットの歩行パターンを求めるといったこれらの手順から、昆虫のそれぞれの足の運動の特徴と運動の時間変化について解析し、無次元化した歩行パターンを決定した。多足（6足）ロボットの歩行の基礎的な特徴として、それぞれ前足の働きは体を引っ張り、中足は体を支え、後足は、体を押し進めるようにしていることが分かった。