多足歩行ロボットのシーケンス制御

阪本　　猛，中田　克圭，北村　岩雄，
松田　秀雄，池田　長康

A study of sequential control of a multiped walking robot

Takesi Sakamoto, Katsuyosi Nakada, Iwao Kitamura,
Hideo Matsuda, Nagayasu Ikeda

The maintenance of a electric power-transmission line is very important for stable supply of electricity. Now many power-transmission lines goes through mountains. And then, in the case of ordinary vehicles such as trucks, roads to maintain the lines must be constructed over the mountains. It follows reckless destructions of forests as a ecological system. A multiped walking robot becomes a indispensable vehicle to move through a forest without a road. This is our object of the study on a multiped walking robot. The concept of the robot is aimed at a simple system as possible. The robot has four legs. The sequential control system consisted of DC moteres, linear actuators and limit switches. The operation state of the switches may be expressed by multi-dimensional logic vector at times, and the transition from one vector to another vector is represented by simplified logic matrix which is taken to a few cofactors.

キーワード：多足歩行ロボット，シーケンス制御，論理回路，遷移行列

1．まえがき

現代社会において電気無しでの生活は考えられない。安定した電力供給は電力会社による送電線の保守点検などの絶え間ない努力の上に成り立っている。しかし送電線の多くは水力発電のためのダムとの接続やコストなどの面から山斜面，又は山中深くを走っている。現在ではそのために送電線までの道路をわざわざ施設している。これはコスト増大などの経営面の問題だけでなく森林伐採や山斜面の水脈の切断などの環境面での問題も起こしている。しかし送電線まで徒歩で行くには作業者の安全の確保が難しくなる。そこで送電線のあるような森林や急な斜面を移動するのに道路を必要としない乗り物として多足歩行するロボットの研究が不可欠であると考えられる。このロボットはまた荒地，湿地への侵入が可能であり調査，研究にも有用であると考えられる。

2．ロボットの基本設計

歩行ロボットを製作するにあたって，シンプルなシステムで多足歩行ロボットの制御をすることを目標とした。このロボットは図１のように２カ所で可動（２自由度）の足を４本持つ。
動力としては直流モーターとボールネジを組み合わせたリニアアクチュエータを用いる。
これは将来実用化するときに油圧シリンダーの使用が予想されるためである。
センサーとしてリミットスイッチを関節周辺に配置し，ある一定の角度になったときにこれを検知できるようにしたそしてリレーを使用したシーケンス制御を行っている。

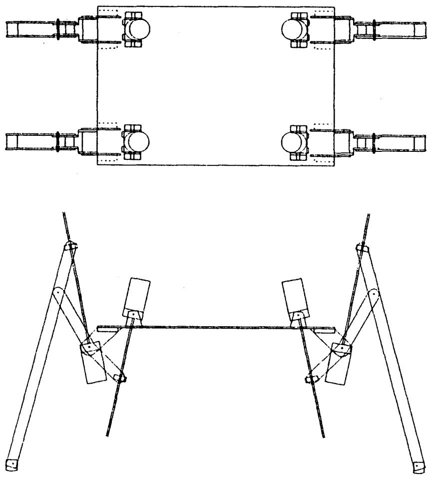

図１

3．歩行の流れ

3．1．１本足の動き

図２は１本足におけるスイッチとモーターの位置を示している。ｓ１からｓ４までのスイッチは一定角度になると取り付けられたバーによって押されるように配置したリミットスイッチであり，スイッチｓ５は地面に付いたときにオンになる。

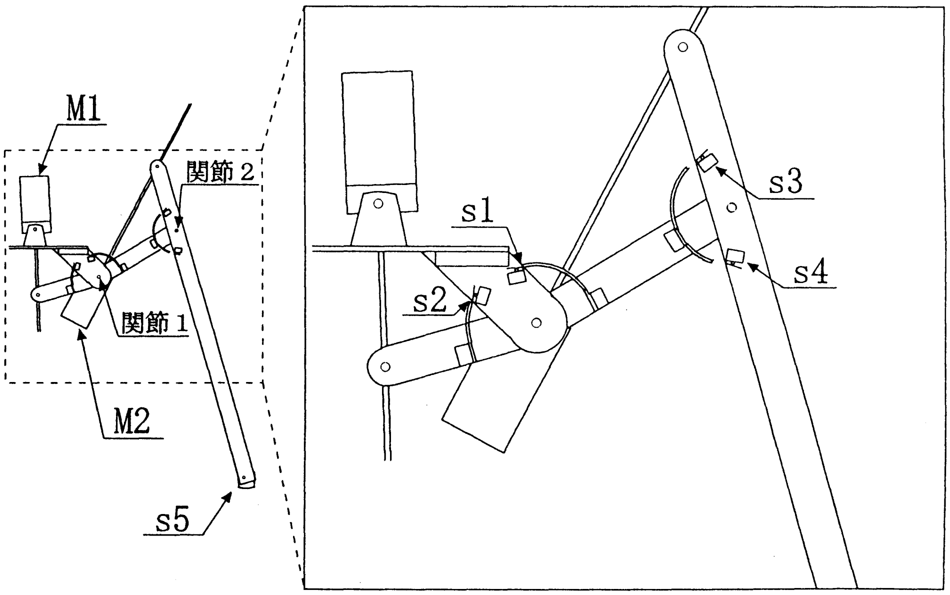

図２

図2のスイッチを持つ1本足の動きを示したのが図3である。
図3の1ではモーターM1を正回転させて関節1を軸にして足を上げる。
同図の2ではモーターM2を逆回転させて関節2を軸にして足を前に出す。
同図の3ではモーターM1を逆回転させて関節1を軸にして足を降ろす。
同図の4ではモーターM2を正回転させて関節2を軸にして足を引き寄せる。
そしてまた同図の1へと戻り，これを繰り返すことによって歩行する。

このような動きをする時の足1本の各スイッチの状態遷移を表したものが表1である。1本の足にはスイッチが5個配置されている。同表にはそれぞれのスイッチがオフのとき0，オンのとき1と表している。またモーターは－1が逆回転，0が静止，1が正回転を表す。またモーターの枠がずれているのはモーターの動きによってある時間の状態から次の状態に移るからである。
例えば一番左の欄を見るとモーターM1が正回転することにより時間t1からt2に遷移するということを表している。
尚，時間軸は一定間隔ではなく状態の変化で進む時間軸としてある。

図4には時間t1におけるスイッチの状態，モーターの状態を対応させて説明している。スイッチs4がオンの状態でモーターM2が静止し，モーターM1が正回転し関節1を軸に足をあげている途中の状態であることを示し，次のt2の状態に進んでいることを示す。

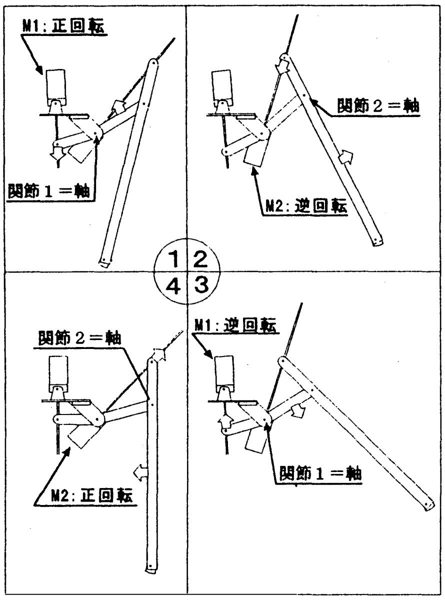

図3

表1

	t1	t2	t3	t4	t5	t6	t7	t8	t1
s1	0	1	1	1	0	0	0	0	0
s2	0	0	0	0	0	1	1	1	0
s3	0	0	0	1	1	1	0	0	0
s4	1	1	0	0	0	0	0	1	1
s5	0	0	0	0	0	1	1	1	0
M1	1	0	0	-1	-1	0	0	1	
M2	0	-1	-1	0	0	1	1	0	

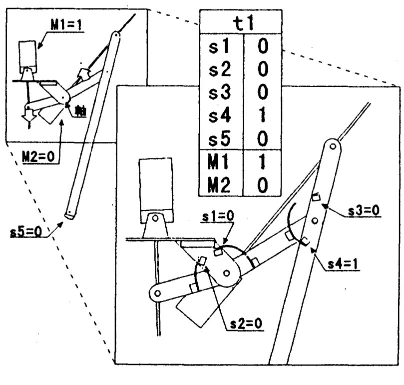

図4

3．2．　4本足の基本的な動き

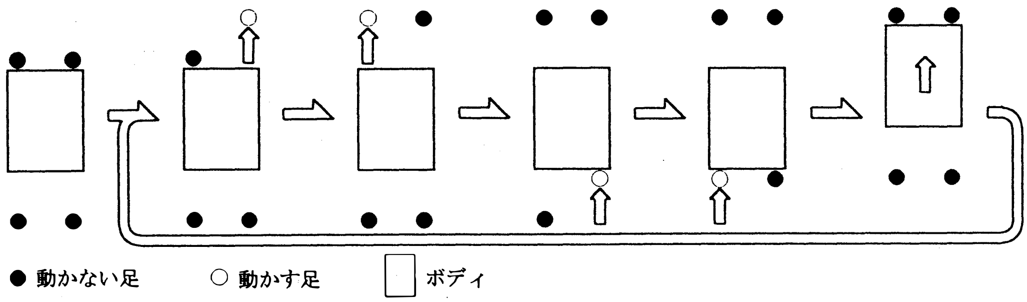

図5

図5は4本足歩行の動作の基本的な流れを示す。4本の足のうち，足3本で体を支えながら残りの1本を次の位置に進める。進める足の順番は右前，左前，右後，左後の順に進め，最後に4本を同時に動かすことにより重心を移動させる。
足1本の状態遷移表を基本に上記の4本足の状態遷移を示したのが表2である。

表2

	t1	t2	t3	t4	t5	t6	t7	t8	t9	t10	t11	t12	t13	t14	t15	t16	t17	t18	t19	t20	t21	t22	t23	t24	t25	t26	t1
s1	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
s2	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0
s3	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0
s4	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
s5	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0
s6	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
s7	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
s8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0
s9	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
s10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0
s11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
s12	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
s13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0
s14	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
s15	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
s16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0
s17	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	1	1	1	1
s18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0
s19	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	1	1
s20	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	1	1	1	1

M1		1	0	0	-1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	
M2		0	-1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	
M3		0	0	0	0	0	1	1	0	0	-1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
M4		0	0	0	0	0	0	0	-1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	
M5		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	-1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	
M6		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	-1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	
M7		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	-1	-1	0	0	0	
M8		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	-1	0	0	1	1	0	

この歩行ロボットのスイッチは足１本につき５個のスイッチがあるので足４本でｓ１からｓ20までの20個のスイッチがある。モーターの数は足１本につき２個のモーターがあるので足４本でＭ１からＭ８の８個のモーターがある。時刻ｔ１からｔ６までにおいて右前足を前に進め，時刻ｔ７からｔ12の間において左前足を前に進め，時刻ｔ13からｔ18の間において右後足を前に進め，時刻ｔ19からｔ24の間において左後足を前に進め，時刻ｔ25からｔ26において重心を前に進めている。従って周期は26のステップから成る。

４．論理遷移行列の考え方

４本の足に付いているスイッチは20個であり，これらのスイッチの状態を表現するのに20次元の１つのベクトルと考える。ロボットが動作することはこの20次元ベクトルが次々と別のベクトルに遷移していくことを意味している。このベクトルは１，０の２値関数であるから遷移行列も２値からなる特殊な行列計算によって表現することを考えた。

４．１．１本足の場合

足一本において，この遷移を行列によってベクトルの遷移を表現することを考えた。表１をもとに時刻ｔ１に掛けるとｔ２になる行列を調べた。それ以後の時刻についてもすべての場合について調べた。
その一例を図６に示す。

$$\begin{array}{cccc} t2 & & & t1 \\ \begin{pmatrix}1\\0\\0\\1\\0\end{pmatrix} & = & \begin{pmatrix}\phi&\phi&\phi&1&\phi\\\phi&\phi&\phi&0&\phi\\\phi&\phi&\phi&0&\phi\\\phi&\phi&\phi&1&\phi\\\phi&\phi&\phi&0&\phi\end{pmatrix} & \begin{pmatrix}0\\0\\0\\1\\0\end{pmatrix}\end{array} \qquad \begin{array}{cccc} t8 & & & t7 \\ \begin{pmatrix}0\\1\\0\\1\\1\end{pmatrix} & = & \begin{pmatrix}\phi&0&\phi&\phi&0\\\phi&1&\phi&\phi&1\\\phi&0&\phi&\phi&0\\\phi&1&\phi&\phi&1\\\phi&1&\phi&\phi&1\end{pmatrix} & \begin{pmatrix}0\\1\\0\\0\\1\end{pmatrix}\end{array}$$

$$\begin{array}{cccc} t4 & & & t3 \\ \begin{pmatrix}1\\0\\1\\0\\0\end{pmatrix} & = & \begin{pmatrix}1&\phi&\phi&\phi&\phi\\0&\phi&\phi&\phi&\phi\\1&\phi&\phi&\phi&\phi\\0&\phi&\phi&\phi&\phi\\0&\phi&\phi&\phi&\phi\end{pmatrix} & \begin{pmatrix}1\\0\\0\\0\\0\end{pmatrix}\end{array} \qquad \begin{array}{cccc} t6 & & & t5 \\ \begin{pmatrix}0\\1\\1\\0\\1\end{pmatrix} & = & \begin{pmatrix}\phi&\phi&0&\phi&\phi\\\phi&\phi&1&\phi&\phi\\\phi&\phi&1&\phi&\phi\\\phi&\phi&0&\phi&\phi\\\phi&\phi&1&\phi&\phi\end{pmatrix} & \begin{pmatrix}0\\0\\1\\0\\0\end{pmatrix}\end{array}$$

図６

この行列とベクトルとの積は通常の行列計算方法に従うが，個々の積の計算は論理積と論理和を用いる。また同図でφは空集合を表す。このままでは一回の遷移に付き一つの行列が必要のため，時刻ｔ１からｔ８だと８つの行列が必要になる。これでは扱う情報が大きくなり過ぎるため，情報の圧縮を考えた。この４つの行列において空集合でお互いを補い合うことにより同図で示したこの４つの行列を１つにまとめることができた。その結果表現できたのが図７にあるＣ１行列である。

$$\begin{array}{cccc} t2 & & C_1 & t1 \\ \begin{pmatrix}1\\0\\0\\1\\0\end{pmatrix} & = & \begin{pmatrix}1&0&0&1&0\\0&1&1&0&1\\1&0&1&0&0\\0&1&0&1&1\\0&1&1&0&1\end{pmatrix} & \begin{pmatrix}0\\0\\0\\1\\0\end{pmatrix}\end{array}$$

図７

これと同じ考えに基づき求めたのが図８のC_2 C_3の行列である。

$$C_1=\begin{pmatrix}1&0&0&1&0\\0&1&1&0&1\\1&0&1&0&0\\0&1&0&1&1\\0&1&1&0&1\end{pmatrix} \quad C_2=\begin{pmatrix}1&0&0&0&0\\0&1&0&0&1\\0&0&0&0&0\\0&0&0&0&0\\0&1&0&0&1\end{pmatrix} \quad C_3=\begin{pmatrix}0&0&0&0&0\\0&0&0&0&0\\0&0&1&0&0\\0&0&0&1&0\\0&0&0&0&0\end{pmatrix}$$

$$C_4=\begin{pmatrix}0&0&0&0&0\\0&0&0&0&0\\0&0&1&0&0\\0&0&0&0&0\\0&0&1&0&0\end{pmatrix} \quad I=\begin{pmatrix}1&&&&0\\&1&&&\\&&1&&\\&&&1&\\0&&&&1\end{pmatrix}$$

図８

4．2．4本足の場合

次に4本足全体について考える。

20次元のベクトルを遷移させる行列となると20×20の巨大な行列となり，その内容の複雑さと取り扱いの難しさが予想される。しかしここで先ほどのＣＸ行列と単位行列I を組み合わせることにより式（1）のように小行列を用いて表すことができる。

$$\begin{pmatrix}1\\0\\0\\1\\0\\0\\1\\0\\1\\0\\0\\1\\0\\1\\1\\0\\1\\0\\1\\1\end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \begin{matrix}1&0&0&1&0\\0&1&1&0&1\\1&0&1&0&0\\0&1&0&1&1\\0&1&1&0&1\end{matrix} & & \mathrm{O} & \\ & \begin{matrix}1&0&0&0&0\\0&1&0&0&0\\0&0&1&0&0\\0&0&0&1&0\\0&0&0&0&1\end{matrix} & & \\ & & \begin{matrix}1&0&0&0&0\\0&1&0&0&0\\0&0&1&0&0\\0&0&0&1&0\\0&0&0&0&1\end{matrix} & \\ \mathrm{O} & & & \begin{matrix}1&0&0&0&0\\0&1&0&0&0\\0&0&1&0&0\\0&0&0&1&0\\0&0&0&0&1\end{matrix} \end{pmatrix} \begin{pmatrix}0\\0\\0\\1\\0\\0\\1\\0\\1\\0\\0\\1\\0\\1\\1\\0\\1\\0\\1\\1\end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C_1 & & & \mathrm{O} \\ & I & & \\ & & I & \\ \mathrm{O} & & & I \end{pmatrix} \begin{pmatrix}0\\0\\0\\1\\0\\0\\1\\0\\1\\0\\0\\1\\0\\1\\1\\0\\1\\0\\1\\1\end{pmatrix} \tag{1}$$

5．結　　び

この研究ではシーケンス制御による多足（4足）ロボットの歩行を考えてきた。可能な限りシンプルなシステムでの制御を目指すうちに，スイッチの状態をベクトルで表現し，行列計算によってその遷移を表現できることが判明した。まず1本の足の各時刻における論理ベクトルを表にし，それぞれを遷移させるマトリックスを作った。そのマトリックスを圧縮することにより三種類の5行×5列の行列にまとめることができた。これにより遷移表現が明確となり見通しも良くなった。これにより4本の多足ロボットを考えた高次のベクトルの場合にも，この遷移マトリックスを組み合わせて使用することにより，20次ベクトルとしては飛躍的な容易さでこの遷移を表現することができた。

今後の研究はこの遷移行列によってモーターへの出力を表現する方法を考えるとともに，これらの論理計算に適していると思われるコンピューターでの処理を目指すべきであると思われる。