

ブラキエーション型移動ロボットの研究

田 口 幹*

A Study on Brachiation Type Mobile Robot

Kan TAGUCHI

Abstract

This paper provides a new type of mobile robot, "Brachiation Robot". The brachiation makes use of the swing of a pendulum due to gravity, as a gibbon exhibits in branch transfer motion. In this paper the author shows the method to control the brachiation robot by showing some results of the computational simulations using 3-link-model robot. The most difficult subject in this study is how to control it dynamically and with taking advantage of gravity force. And the author propose a kind of feed-forward control system with a certain feed-back loop for the motion of the brachiation robot.

Key Words: Brachiation, Mobile robot, Multi-degree-of-freedom System, Swing of a Double Pendulum

1. は じ め に

現在,車輪を使った移動や脚を用いた移動など,様々な移動を行うロボットが提案,試作されている。初期の頃の移動ロボットはまさに動くだけのものであったが,近年は研究も更に進み,かなりなめらかに移動するものも増えてきた。しかし人間の目から見ると,まだまだぎこちないと言える。そのゆっくりとした,ぎこちない動きの大きな原因となっているのが重力の影響である。例えば歩行ロボットは重力に逆らって脚を動かさなければならずエネルギー効率が良いとは言えない。

陸上に生活する生物にとって重力は大きな重荷であ

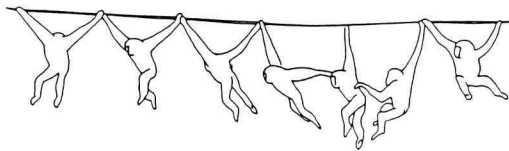


Fig. 1. Brachiation of a gibbon

る。しかし,中には重力をうまく利用して移動している生物もある。たとえば,樹上生活を行っているサルなどにみられるブラキエーションと呼ばれる移動方法がある。Fig. 1 はテナガザルのブラキエーションを示したものであり,このような移動方式をするロボットを実現することが本研究の目的である。

ブラキエーション型移動方法の研究はいくつか行われているが,テナガザルのロボットをそのまま作るのは難しいので,自然な振動の観点からテナガザルの体形と腕渡りとを考え,この時運動の本質を失わない程度に形態の全体的特徴を単純化して考えている。これらの研究を大別すると,テナガザルは大まかにみて大きな腕2本でその形状を表す事ができるという考え方と,腕2本の他に胴体や足も必要であるという考え方ががある。前者を2リンクモデル^{4,6-8)},後者を多リンクモデル^{1-3,5)}と呼ぶ,もちろん,テナガザルの運動そのものを動物運動学の立場から研究をしている研究者もいる。

ブラキエーション型ロボットは移動ロボットの一種であるが,従来のロボットにおいてマイナスの要因となっていた重力を積極的に移動に利用しようというところに特長がある。

また,先に述べたように,ブラキエーションは,テ

ナガザルや人間の雲梯運動のように、枝などにぶら下がり移動する移動方法であるが、空中における姿勢制御という観点から、多リンクモデルで現代制御の問題として扱っている研究もある。特に、多リンクモデルでは自由度が多く、梯子を把持する腕と前に動こうと振動を作る胴体をそれぞれ独立に制御する事ができる。そのため、制御方法によっては一回の移動後に胴体を初期姿勢、あるいは次に移動を行いやすい姿勢に戻すまで把持した腕を離さないでおくことが必要となる場合がある。そのため連続移動を行おうとした場合、うまく制御しないと待ち時間ができてしまう。2リンクモデルの場合は、次の梯子を把持する事と前に移動する事を一つの腕で行うが、この場合移動終了時のリンク姿勢は初期姿勢と同じである。つまり、多リンクモデルで存在した待ち時間が無くなるうえ、一度移動できれば同じ移動軌道で何度でも連続して移動できるという特長がある。

本研究では、腕2本に胴体と足は一つになっていると考えた3リンクのモデルについて研究を行った。テナガザルはうまく腕や身体を振って移動して行くわけであるが、各リンクどう振るかに重点を置くと、一回の梯子の把持はできても連続移動を行おうとすると各部に不必要な速度が残ったりして、毎回違った振り方をしなくてはならなくなる可能性がある。そこでブラキエーション型ロボットを連続移動させるために、決められた初期姿勢、終端姿勢になるような各リンクの駆動軌道を見つけたし、その駆動方法を繰り返すだけで連続して移動するような動き方を発見することがこの論文の目的となる。

2. ブラキエーション運動のモデル化

前章で述べたように2リンクモデルによるブラキエーションは制御しやすく、一度移動できれば同じ軌道で連続移動できる利点を持っているが、ロボットを振る作業と梯子を掴みに行く作業を1つのリンクで行わなくてはならず、制御条件から振りも大きくなりエネルギー的に不利である。逆に多リンクモデルでは梯子を掴む腕と振る胴体が別のリンクによって行われるため、梯子の把持する制御は行きやすいが移動姿勢の制御が難しい。また、一般にロボット自体の各部の速度が運動の最初と連続移動中とで異なっているため一度目のリンクの軌道とそれ以降の移動軌道は異なることが多い。

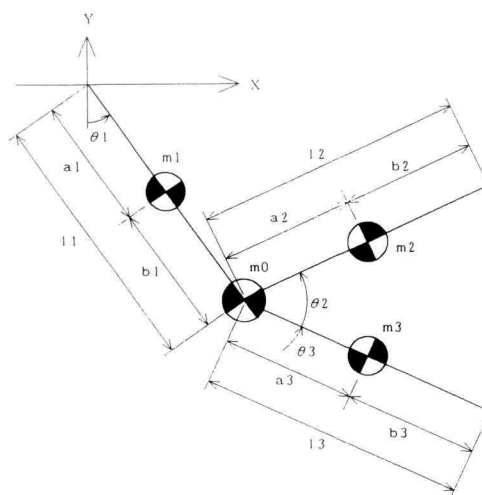


Fig. 2. A model of the brachiation robot

本研究では多リンクモデルでありながら2リンクのように、一つの軌道の繰り返しによって連続的に移動できるようなリンク駆動軌道を作り出す3リンクモデルを構成する。

具体的には以下の設定を基に、シミュレーションモデルを構築した。

- ① モデルは腕二本、胴体一つとし、鉛直平面内の運動のみを考えるものとする。
- ② リンク同士のジョイント部の摩擦抵抗は考えない。
- ③ 駆動できるのは胴体に対して腕を動かす肩の部分の二関節とする。
- ④ この系は鉛直平面内の運動のみを行うとする。
- ⑤ 掴んでいる部分の回転はフリー（外力トルクは与えない）とする。

Fig. 2 に設定モデルの概略図を示す。

また、初期姿勢、終端姿勢を次のように仮定した。初期姿勢は両腕が梯子を掴んでいるように決め、両腕先間の距離 (X) と同じだけ離れた距離に次に掴む梯子 (目標) を設定し、後方の腕にあたるリンクがこの梯子を掴んだ状態を終端姿勢とする。そして、その時のロボット全体の姿勢は、初期姿勢と等しくなる事が望ましいとする。

このように初期姿勢と終端姿勢を等しくする事により、同じ移動方法を繰り返すによって連続移動ができる。特に今回は梯子を掴むときの衝撃を無くすように、移動終了時の各リンクの角速度が0になるようにし

Table 1. Parameters of the brachiation robot

m_0	リンクジョイント部 (歯車, モータ等) に加わる質量 (kg)
m_i	リンクの質量 (kg)
θ_i	リンクの角度 (deg)
$\dot{\theta}_i$	リンクに関する角速度 (m/s)
$\ddot{\theta}_i$	リンクに関する角加速度 (m/s ²)
l_i	リンク腕の長さ (m)
a_1	ハンド部からリンク 1 の質量重心までの長さ (m)
a_2	関節部からリンク 2 の質量重心までの長さ (m)
a_3	関節部からリンク 3 の質量重心までの長さ (m)
b_1	リンク 1 の質量重心から関節部までの長さ (m)
b_2	リンク 2 の質量重心からハンド部までの長さ (m)
b_3	リンク 3 の質量重心から先端部までの長さ (m)
I_i	リンクの重心回りに関する慣性モーメント (kg・m ²)
U_i	リンクに加わるトルク (N・m)
μ_i	粘性摩擦係数
g	重力加速度 (m/s ²)
D T	シミュレーションでの刻み時間 (s)
t	時間 (s)

た。

上記のモデルの運動方程式を, ラグランジュの運動方程式を用いて算出する。

モデルの各リンクの重心位置の座標は Table 1 の記号を用いて以下ようになる。

$$x_0 = l_1 \sin \theta_1 \quad (2-1)$$

$$y_0 = -l_1 \cos \theta_1 \quad (2-2)$$

$$x_1 = a_1 \sin \theta_1 \quad (2-3)$$

$$y_1 = -a_1 \cos \theta_1 \quad (2-4)$$

$$x_2 = l_1 \sin \theta_1 + a_2 \sin (\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) \quad (2-5)$$

$$y_2 = -l_1 \cos \theta_1 - a_2 \cos (\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) \quad (2-6)$$

$$x_3 = l_1 \sin \theta_1 + a_3 \sin (\theta_1 + \theta_3) \quad (2-7)$$

$$y_3 = -l_1 \cos \theta_1 - a_3 \cos (\theta_1 + \theta_3) \quad (2-8)$$

これらを各角度・角速度に関して微分・偏微分してラグランジュの運動方程式に代入すると, 運動方程式は以下のように導出される。

$$\begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} \\ A_{21} & A_{22} & A_{23} \\ A_{31} & A_{32} & A_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\theta}_1 \\ \ddot{\theta}_2 \\ \ddot{\theta}_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} W_1 \\ W_2 \\ W_3 \end{bmatrix} \quad (2-9)$$

U_1, U_2, U_3 はモータによる外部から加えるトルクを表しており, 特に仮定により U_1 は 0 である。

ここで

$$\begin{aligned} A_{11} = & m_0 l_1^2 + m_1 a_1^2 + I_1 + m_2 \{ l_1^2 + a_2^2 \\ & + 2 l_1 a_2 \cos (\theta_2 + \theta_3) \} + I_2 \\ & + m_3 \{ l_1^2 + a_3^2 + 2 l_1 a_3 \cos \theta_3 \} + I_3 \end{aligned}$$

$$A_{12} = m_2 \{ a_2^2 + l_1 a_2 \cos (\theta_2 + \theta_3) \} + I_2$$

$$A_{13} = m_2 \{ a_2^2 + l_1 a_2 \cos (\theta_2 + \theta_3) \} + I_2$$

$$+ m_3 \{ a_3^2 + l_1 a_3 \cos \theta_3 \} + I_3$$

$$A_{21} = m_2 \{ a_2^2 + l_1 a_2 \cos (\theta_2 + \theta_3) \} + I_2$$

$$A_{22} = m_2 a_2^2 + I_2$$

$$A_{23} = m_2 a_2^2 + I_2$$

$$A_{31} = m_2 \{ a_2^2 + l_1 a_2 \cos (\theta_2 + \theta_3) \} + I_2$$

$$+ m_3 \{ a_3^2 + l_1 a_3 \cos \theta_3 \} + I_3$$

$$A_{32} = m_2 a_2^2 + I_2$$

$$A_{33} = m_2 a_2^2 + I_2 + m_3 a_3^2 + I_3$$

$$W_1 = -m_2 l_1 a_2 (2 \dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3) (\dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3) \sin (\theta_2 + \theta_3)$$

$$- m_3 l_1 a_3 (2 \dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_3) \sin \theta_3$$

$$- m_0 g l_1 \sin \theta_1 + m_1 g a_1 \sin \theta_1$$

$$+ m_2 g \{ l_1 \sin \theta_1 + a_2 \sin (\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) \}$$

$$+ m_3 g \{ l_1 \sin \theta_1 + a_3 \sin (\theta_1 + \theta_3) \} + \mu_1 \dot{\theta}_1$$

$$W_2 = m_2 l_1 a_2 \dot{\theta}_1^2 \sin (\theta_2 + \theta_3)$$

$$+ m_2 g a_2 \sin (\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) + \mu_2 \dot{\theta}_2$$

$$W_3 = m_2 l_1 a_2 \dot{\theta}_1^2 \sin (\theta_2 + \theta_3) + m_3 l_1 a_3 \dot{\theta}_1^2 \sin \theta_3$$

$$+ m_2 g a_2 \sin (\theta_1 + \theta_2 + \theta_3)$$

$$+ m_3 g a_3 \sin (\theta_1 + \theta_3) + \mu_3 \dot{\theta}_3$$

である。

この (2-9) 式を基にしてシミュレーションを行う。

ただし, 記号の添え字 $i (i=1, 2, 3)$ は, リンクの番号である。

3. 計算機シミュレーション

前章で導出された運動方程式を基に計算機シミュレーションにより軌道の発見を行った。

運動モデルは初期姿勢と終端姿勢を等しくする条件であるので, この条件下での運動を達成するための各リンクの移動軌道を作ることが軌道発見手法である。しかしリンク 2 及び 3 はアクチュエータによりトルクを与えることができるので目標角度を満たすような制御が可能であるが, リンク 1 は仮定により外力としてトルクを与えることができないため, 直接角度を制御することはできない。そこで, リンク 2 及び 3 をうまく動かしてリンク 1 を動かす必要がある。

具体的なシミュレーションは以下のように行った。

- ① ロボットの寸法等を入力する。
- ② 掴みに行く腕 (リンク 2) の動きは一定とする。
- ③ リンク 3 (胴体部) の動きは, 初めと終わりの姿勢が分かっていることから初期姿勢, 終端姿勢での各リンク間の角度が分かる。次に中間時点での角度を数点与え, スプライン補間によって得られる

ものをリンク3の角度の時間的な目標値とする。

- ④ この目標値を(3-1)式に代入し、ルンゲ・クッタ法によってリンク1(掴んだままの腕)の動きを求める。また、逆動力学計算((3-2), (3-3)式)によりその時点で必要な各トルク(U_2 , U_3)の目標値を求める。

$$\ddot{\theta}_1 = (-W_1 - A_{12}\ddot{\theta}_2 - A_{13}\ddot{\theta}_3)/A_{11} \quad (3-1)$$

$$U_2 = A_{21}\ddot{\theta}_1 + A_{22}\ddot{\theta}_2 + A_{23}\ddot{\theta}_3 + W_2 \quad (3-2)$$

$$U_3 = A_{31}\ddot{\theta}_1 + A_{32}\ddot{\theta}_2 + A_{33}\ddot{\theta}_3 + W_3 \quad (3-3)$$

$\ddot{\theta}_2$, $\ddot{\theta}_3$ は②, ③より与えられる各角加速度である。

- ⑤ 以下の(3-4), (3-5)式で表される2つの評価値 E_1 , E_2 によって③で与えた角度目標値を評価する。

$$E_1 = Q_1 U_4 + Q_2 \dot{\theta}_e \quad (3-4)$$

$$E_2 = |Q_3(\theta_{1f} - \theta_{1e})| \quad (3-5)$$

ただし,

Q_1, Q_2, Q_3 : 重み係数

U_4 : 各時間ステップごとにリンク2, 3に加えるトルクの絶対値の合計

θ_{1f} : リンク1の終端姿勢での目標角度

θ_{1e} : 実際にシミュレーションを行ったときの終端姿勢(シミュレーション終了時刻)のリンク1の角度

$\dot{\theta}_{3e}$: 実際にシミュレーションを行ったときの終端姿勢(シミュレーション終了時刻)でのリンク3の角速度

スプラインの軌道データを色々変えていき, ③から繰り返す。一番評価値が小さくなった軌道を最適解とする。

- ⑥ 最終的に選り出されたリンク2及び3に加えるべきトルクのパターンを入力として与え, 動力学方程式により各リンクの角度, 角速度, 角加速度を確認する。

シミュレーションに使用する値は実際に製作したロボットの仕様に合わせて行った。Table 2にその数値を示す。

計算機シミュレーションにより得られた各アクチュエータに加えるトルクのパターンをFig. 3に, その時の各リンクの角度, 角速度, 角加速度をFig. 4~Fig. 6に示す。また, そのときのモデルのブラキエーションの様子をスティック線図でFig. 7に示す。

Table 2. Parameters of the prototype model

記号	リンク1	リンク2	リンク3	リンクジョイント部
m (kgf)	0.470	0.380	0.320	0.260
a (mm)	191	54	149	
l (mm)	295	295	328	
I_G (kgf \cdot m 2)	0.00809	0.00283	0.00293	
θ (deg)	25.0	155.0	25.0	
$\dot{\theta}$ (rad/s 2)	0.0	0.0	0.0	
μ	0.005			

θ_f : 終了時の目標角度, $D T = 0.002$ (s)

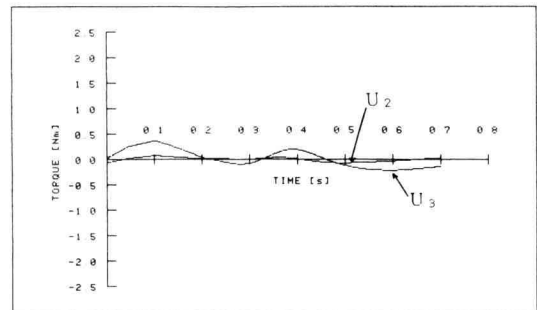


Fig. 3. Torque diagram for the actuators to perform brachiation

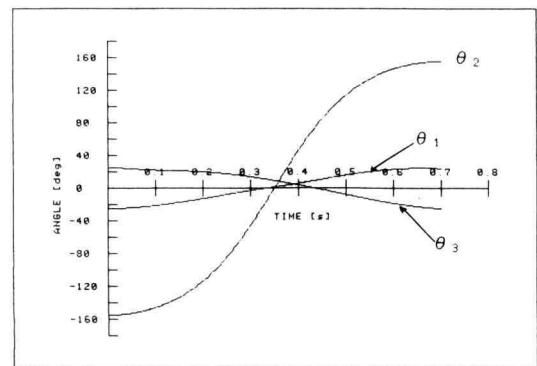


Fig. 4. A diagram of angles between links

2つのリンクで梯子を把持している状態から, 次の梯子を把持することが行えるロボットを試作した。(Fig. 8) ロボットの外觀はシミュレーションモデルを考慮し, 3つのリンクから構成し, 各リンクは同一の軸によって連結されている。リンク1の把持部には外力トルクは無く, リンク3-1間, リンク3-2間は, 各々

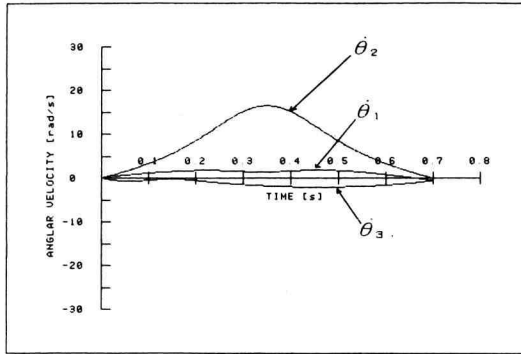


Fig. 5. A diagram for the angular velocity of the joints

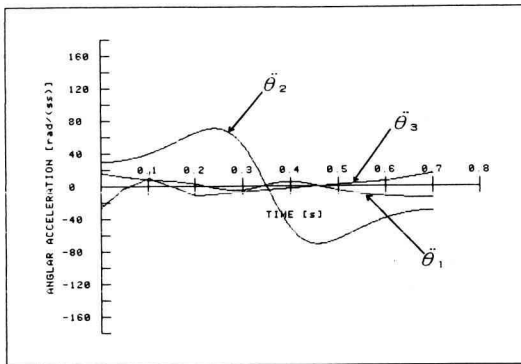


Fig. 6. A diagram for the angular acceleration of the joints

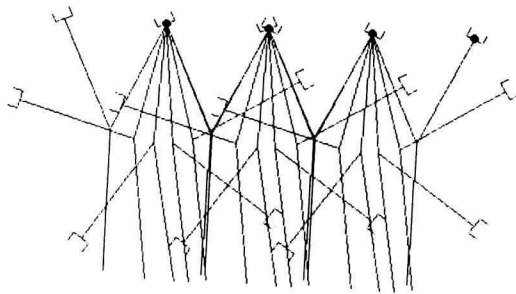


Fig. 7. A result of the simulations (stick diagram of brachiation)

DC モータによりトルクが与えられるものとした。また、各関節には、リンク間の角度を得るためエンコーダを搭載した。ハンド部については、梯子の把持を行えるフック形のものとした。リンク 1 は梯子とボールベ

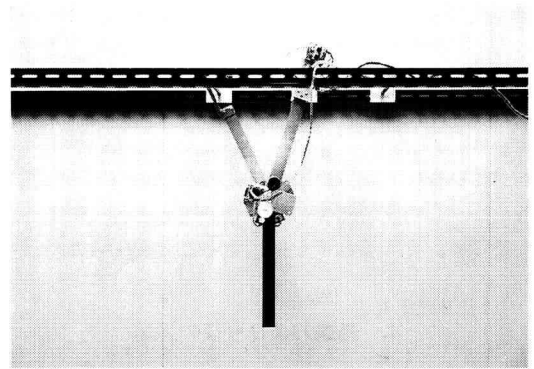


Fig. 8. A prototype model for the brachiation robot

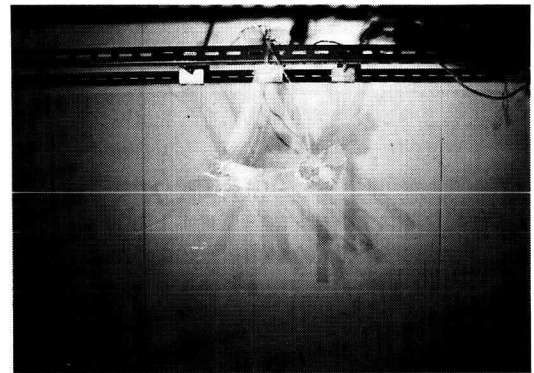


Fig. 9. Prototype model doing brachiation

Table 3. Specification of the motors

escap社製 DC サーボモータ	28L28-416E
定格電圧	24 [V]
無負荷回転数	5300 [rpm]
起動トルク	0.55 [kg·cm]
出力	7.6 [W]
escap社製 ギアヘッド	R22
減速比	1 : 33.1

アリングを介して固定されており、シミュレーションと同様に左右動は無い。モータの仕様は Table 3 に示す。

制御方法はシミュレーションモデルと同様にリンク 2 とリンク 3 に設置した DC モータのトルク制御 (電機子の電流制御) を行う。ロボットの 1 回の移動に要する時間は試作したロボットをハンド部を中心として

自由振動をさせたときの値を参考にして0.7秒とし、シミュレーションで得られた各リンクの角度のデータを目標角度として与えた。

実際に試作したロボットが動いている様子を Fig. 9 に示す。

シミュレーションにより得られた把握可能な軌道を各リンクの角度目標値のパターンとして与えて動かしたところ、うまく梯子を把持することができた。

4. 結論および今後の課題

ブラキエーション型ロボットとして、腕2本、胴体ひとつの3リンクモデルを提案し、その運動方程式を構築した。ブラキエーション型ロボットの移動方法として、初期姿勢と終端姿勢を等しくするような移動方法を提案し、計算機シミュレーションにより連続移動が可能であることを確認した。シミュレーションモデルに近い3リンク3自由度のブラキエーション型ロボットを試作し、シミュレーションと同様に梯子を把握することが可能であることを確認した。

試作したブラキエーション型ロボットでは連続移動をするようにできていないのでそのような機械モデルを製作して連続移動を実現する必要がある。そのためには、ロボットの横揺れ等を抑え、摩擦が少なく、すばやく自由に閉開できるハンドの開発が必要である。

さらに、ブラキエーション型移動の解明にはリンク数、自由度数の多い、より人やテナガザルに近いモデルの構築と、移動のための制御則の発見、ブラキエーション型ロボットとの智能化による、自律移動の実現が必要である。

参 考 文 献

- 1) 福田敏夫・近藤裕二：ブラキエーション型移動ロボットの研究(第1報, ブラキエーション移動モデルと制御方法), 第6回ロボット学会学術講演予稿集, (1988) pp. 157-158.
- 2) 福田敏夫・近藤裕二：ブラキエーション型移動ロボットの研究(第2報, 持ち換え移動時の動作について), ロボティクス・メカトロニクス '89 講演会予稿論文集, (1989) pp. 54-55.
- 3) 福田敏夫・近藤裕二：ブラキエーション型移動ロボットの研究(第5報, 励振作用の評価について), 第7回ロボット学会学術講演会予稿集, (1989) pp. 111-112.
- 4) 福田敏夫・斉藤史倫・新井史人：ブラキエーション型移動ロボットの研究(第6報, 移動動作における駆動力波形の生成), 第8回ロボット学会学術講演会予稿集, (1990) pp. 615-616.
- 5) 福田敏夫・斉藤史倫・新井史人：ブラキエーション型移動ロボットの研究(第12報, 7リンクロボットのモデル化と初期コントローラ), 第11回ロボット学会学術講演会予稿集, (1993) pp. 1117-1118.
- 6) 山藤和男・福島 大・山本昌克・前川桂一郎：雲梯を移動するロボットの開発(第1報), 第7回ロボット学会学術講演会予稿集, (1989) pp. 113-114.
- 7) 山藤和男・前川桂一郎・佐々木 毅：雲梯を移動するロボットの開発(第2報), 第8回ロボット学会学術講演会予稿集, (1990) pp. 617-618.
- 8) 山藤和男・福島 大・山本昌克：励振機構をもつ空中移動ロボットの研究, ロボティクス・メカトロニクス '89 講演会予稿論文集, (1989) pp. 60-63.