

4 足 動 的 歩 行 機 械 の 研 究

田 口 幹*

Development of a Quadruped Dynamic Walking Machine

Kan TAGUCHI

Abstract

The author has already developed and reported the mechanism and basic control system of a Six-ligged Walking Machine which walks in static locomotion. And he also mentioned that a fixed gait type walking machine has superiority in walking flat terrain locomotion to the walking machine equipped with three degrees of freedom per each leg.

In this paper, the author proposes such a fixed gaited type dynamic walking machine as can attain two dimensional walking. The prototype machine has 4 legs driven by only one active degree of freedom. Using approximate straight-line mechanism, modified Tchebicheff's link mechanism, the machine walks in dynamic locomotion in a fixed gait (trot gait).

A dynamic control mechanism for center of gravity synchronized with the leg motion is also adopted to maintain the dynamic stability in walking.

Experiments are carried out to certify the dynamic locomotion and the dynamic control mechanism for center of gravity.

1. は じ め に

歩行機械の研究はロボット用の移動機構として研究されてきている。現在までに開発された歩行機械は各脚に多くの自由度を配分し、各脚をコンピュータで協調制御するものと自由度の配分の検討から脚の機構を拘束して制御用のコンピュータの負担を減らす単機能的なものがある。

筆者はこれまでに複雑な機構や制御を用いずに、本研究室で開発した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て機構のみによって歩行に必要な脚先軌跡を得る機構を開発し、これまでに静的歩行を行う6脚歩行機械を発表した¹⁾。

本報告では、より高速移動を可能とする動的歩行を実現するために、これらの機構を用いて4脚動的歩行機械を設計試作したので報告する。

2. 多脚歩行機械の研究の現状

歩行機械は歩行中の安定性の保持の観点から常に静的安定を保っている静的歩行と動的に安定を保ち歩行を続ける動的歩行の2つに大別できる。静的歩行とは、歩行中の歩行体重心の投影点が常に支持脚とその足裏で形成される支持脚多角形の内部に存在し、静的な安定性が保証されている歩行である。一方動的歩行とは、歩行中の歩行体重心の投影点が支持脚多角形外に出ることがあり、動的な姿勢保持制御を必要とする歩行である。一般に静的歩行は脚の数は4脚以上が必要で移動速度よりも安定した移動が重要な不整地移動の実現に有利である。一方動的歩行は脚の数は4脚以下でも実現でき移動速度と移動エネルギーの点で優れている。また水平面での高速歩行にも適している。

ここでは、動的歩行の中でも安定性のよい4脚動的歩行機械と参考までに6脚の歩行機械の研究状況についてその主なものを述べる。

物を静的に支持するときには3点以上の支持点が必要である。よって、静的安定を保ちながら歩行できる最小の脚数は4である。4脚歩行機械はいくつかの開

発例があり、静的歩行を行なうもののほかに、移動速度を速くするために、動的歩行を行なうものも研究も行なわれている。

4脚歩行機械の開発例としては、東大(現東北大)の木村らによる「Collie-1」²⁾、東工大の広瀬らによる「TITAN-IV」³⁾、機械技術研究所の安達らによる「かめ2号」⁴⁾、日立製作所の細田らによる4脚歩行機械⁵⁾、岐阜大の佐野らによる「COLT-2」⁶⁾などが報告されている。

6脚歩行機械では、静的歩行が4脚歩行機械に比べて容易に行える。この歩行は、昆虫型歩容^{*)}と呼ばれる支持脚を3脚ずつ組にすることによって、静的な安定を保ちながら移動するもので、重量を支持する支持多角形と重力の作用を表す重心の支持三角形への投影点との関係も、4脚歩行機械では支持脚の切り替え時に支持三角形の辺上になければならないのに対し、支持三角形の重なりが大きいので、歩行時の安定性を4脚のものより大きくすることができる。

6脚歩行機械としては、機械技術研究所の阿部らの「MELWALK」^{7~9)}、運輸省港湾技術研究所の秋園らの「アクアロボ」¹⁰⁾、東芝の飯田らによる6脚式移動ロボット¹¹⁾、本研究室で開発した6脚歩行機械¹⁾など発表されている。

3. 試作歩行機械の基本的機構

試作した4脚歩行機械は脚の機構として前報¹⁾で報

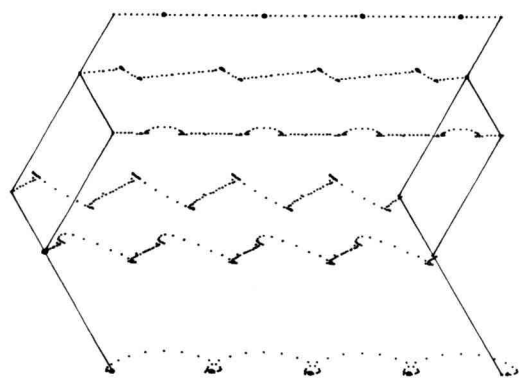


Fig. 3-1. Locus of a foot

*) 歩容とは歩行において各脚をどの順に上げるか、どれくらいの位相差かをいう。つまり、脚の動かし方。

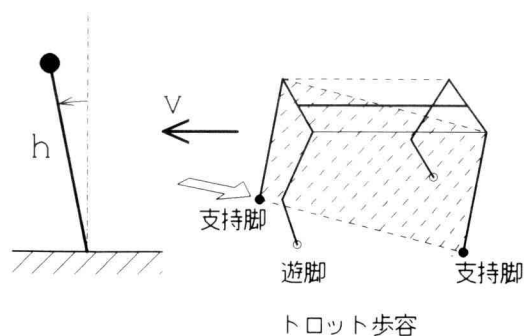


Fig. 3-2. Trot gait

告した改良チェビシェフリンク機構とバンタグラフ機構を用いる。これらの機構による1脚の歩行運動のシミュレーション結果をFig. 3-1に示す。

歩容は対角線上の2脚ずつを1組として、互いに位相を 180° ずらすトロット歩行を行なう固定歩容形式とする。

トロット歩容では、4脚のうち、対角線上に配置された2脚が体重を支持する。したがって、2脚支持時には重力によって重心が脚先を支点として倒れ込む倒れ込みが発生する(Fig. 3-2参照)。この倒れ込みが大きいと安定した歩行が継続できない。本歩行機械では安定したトロット歩容を実現するために、胴体部中央に扇型の重りを3段に分けて配置し、これを脚に同期させて回転運動を行なわせることにより慣性力を発生し、倒れ込みを制御する機構を重心制御機構と名付け採用

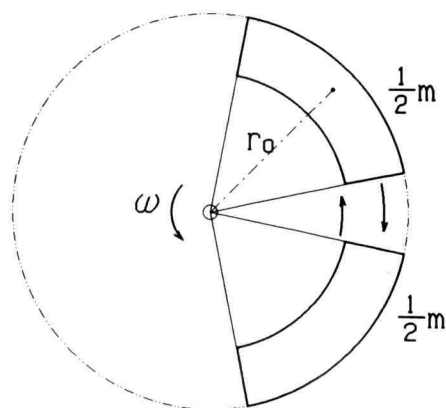


Fig. 3-3. Dynamic control mechanism for center of gravity

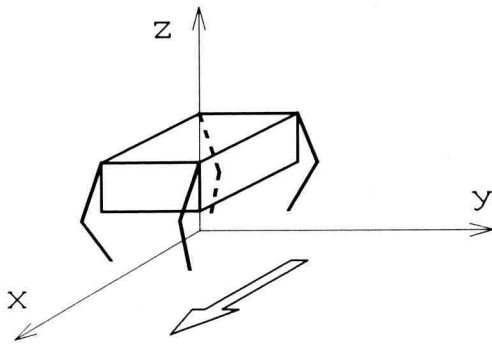


Fig. 3-4. Coordinate system

する。

重心制御機構は Fig. 3-3 に示すように 3 段の重りからなり、その全重量を上から 1:2:1 という比率に配して設置している。この 3 つの重りを脚の前後位置と同期させ、同じ周期で回転運動を行なわせる。回転方向は、上部と下部の重りを同方向に同位相で、中央部の重りを逆方向に位相を 180° ずらして回転させる。この回転の位相は、チェビシェフリンク機構の駆動リンクの 0° と 180° の時点（各脚がそのストロークの中点にあるとき）で重りが前後となるように設置する。

ここで重心制御機構の静的と動的な働きをまとめる。Fig. 3-4 に示すように、歩行機械の前後方向に X 軸、左右方向に Y 軸を考える。重心制御機構は、静的にも動的にも X 軸方向にはバランスしているので Y 軸方向の重心の揺動と慣性力を考えればよい。

重心制御機構の全質量を m 、重心制御機構を除いた

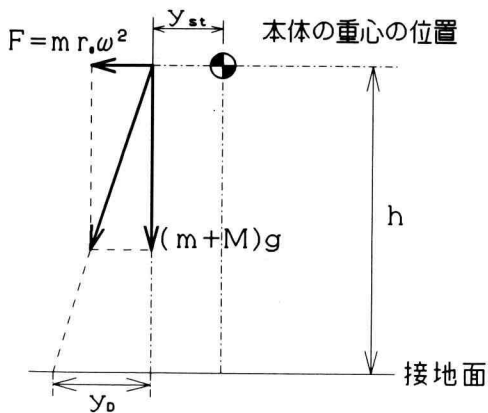


Fig. 3-5. Dynamics

歩行機械全体の質量を M 、重心制御機構の重りの回転角速度（脚の駆動と連動している）を ω とする。まず、静的には 3 つの扇型の重りは左右（Y 軸方向）に動く。その移動量は

$$Y_{st} = r_0 \sin \omega t \frac{m}{m+M} \quad (3-1)$$

ここで、 r_0 : 扇型重りの重心の回転半径となる。

また、動的には各々の重りによる遠心力の和を考えれば良いのでそれは、

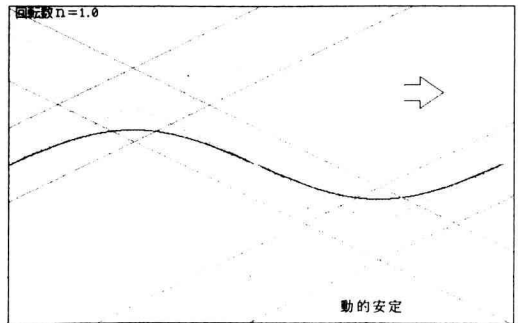
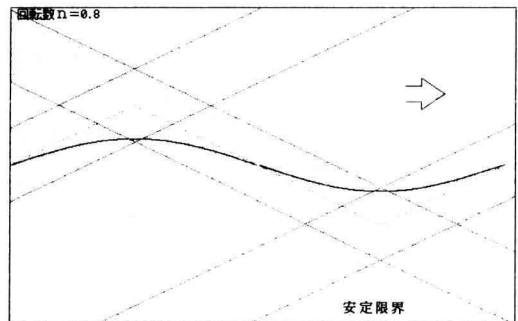
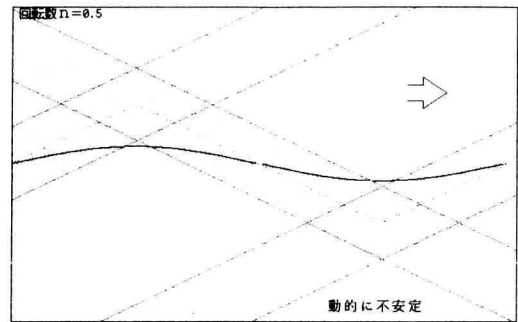


Fig. 3-6. C.G. print

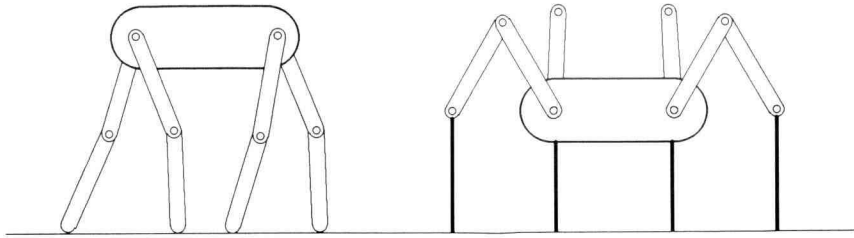


Fig. 4-1. Two types of walking animal

$$F = mr_0 \omega^2 \sin \omega t \quad (3-2)$$

となり、この遠心力により全重心に加わる重力の方向が見かけ上変化し、その接地面への（見かけの）重心投影点 Y_D は、

$$Y_D = \frac{h}{(m+M)g} mr_0 \omega^2 \sin \omega t \quad (3-3)$$

となる。(Fig. 3-5 参照)

重心投影点の軌跡は Fig. 3-6 に示すように慣性力により支持脚多角形内部になっている。

4. 試行歩行機械の概要

広瀬らは、脚の形態を Fig. 4-1 に示すように、ほ乳類に見られるような M (mammal) 形脚と、昆虫類に見られる I (insect) 形脚とに分類している。凹凸の多い不整地歩行では歩行機構の脚の長さは長ければ長いほど歩幅がかせげて都合がよく、安定性を考えると重心が低い方がよい。さらに、この 2 種の脚を移動に必要なエネルギーの効率という点から比較してみると、M 形よりも I 形脚が歩行機械に適していると指摘している。

しかし、本研究で想定される歩行機械では、本体の自重を支えているのは、疑似直線機構である改良チェビシェフリンクなどの機構的な部分であり、多自由度の歩行機械でみられるように、制御されたサーボモータなどに代表されるアクチュエータではないこと、動的歩行の各時点の動的安定性は倒立振子でモデル化されるので重心位置が高い方が有利であることから本研究で試作する歩行機械では、M 形脚とし、全体の大きさを小さくすると共に重心の位置を高くして動的安定を保つこととした。

具体的には以下のような方針で設計した。

- (1) 歩行機械は、脚の形態を M 形とする。

- (2) 歩行に必要な脚先軌跡を得るために改良チェビシェフリンク機構を用い全対偶を回転対偶とする。

- (3) 脚はパンタグラフ機構とし、脚先が改良チェビシェフリンク機構の描く疑似直線を拡大した疑似直線運動を行なうものとする。したがって、立脚による自重支持は GDA (重力方向分離) により本体前進用モータには負荷をかけないものとする。

- (4) 脚配置は 2 脚を 1 ユニットとし、これを胴体部前後に配置する。

- (5) 歩容は胴体部対角線上の 2 脚を一組にして駆動するトロット歩容とする。

- (6) 動歩行時における動的安定性を確保するために胴体内に重心制御機構を付加する。

- (7) 胴体形状は歩行時に脚との干渉を避けるためできるだけ小さくし、また重心制御機構を積載するに十分な容積を確保する形状とし、かつ十分な剛性を持つ構造とする。

これらを考慮した上で、シンプルで軽量な構造と容積の極小化を図り、また、動的歩行時に於ける衝撃や振動に耐えうる強度をもたせるものとする。基本的な形状は各部の独立性を高め、各部をユニット化する。歩行用動力は 1 つの 5 相ステッピングモータを用い、Fig. 4-2 に示すように水平に設置したシャフトにより

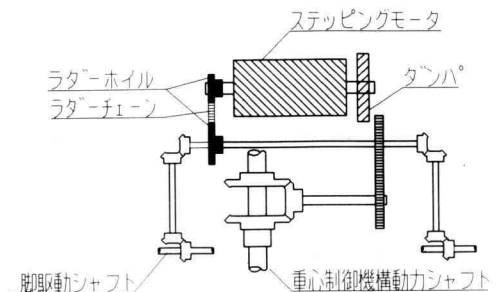


Fig. 4-2. Drive mechanism

回転力を伝達する、重心制御機構への動力伝達も歩行用シャフトに水平に設置したシャフトにより回転力を伝達する。

コントローラおよび電源は外部にあり、本体とケーブルにより接続することとする。

胴体ユニット部は、中央上部に歩行用モータを、下部に重心制御機構を据え付け、前後に配置された2つの脚ユニットを脚に干渉することが無いよう十分な空間を確保した上で確実に支持できるものとする。このため、胴体部は十分な剛性が必要であり、基本的にトラス構造とし、剛性を高める。胴体には2本の剛性の高い梁を貫通させ歩行用モータと重心制御機構が吊るされた形となっている。この梁は脚ユニットととの接

合にも使用され歩行機械全体を支える梁となる。

胴体の上部に歩行用モータとセンサー用の電装系を、下部には重心制御機構を配置し全体重心点なるべく上方になるような設計とする。また、重心制御機構の運動容積の確保と運動時の安全性を高めるために胴体両脇にカバーを有する形状とする。

脚の機構は必要十分な剛性をもたせ、かつ軽量なものとす。脚先部は安定性を確保するため、常に水平に保つように脚ユニットの付け根から脚の膝を介し脚先に至る平行リンクを用いて脚先を水平に保つ機構を設置する。

重心制御用の重りはその運動容積の最小化と必要十分な質量の確保のため比重の大きい鉄を使用する。重心制御機構全体の形状はPhoto 4-1 に示す。

以上のような方針で試作した4脚歩行機械の全体図をFig. 4-3 に、Table 4-1 に主要寸法を、Photo. 4-2 に全景を示す。

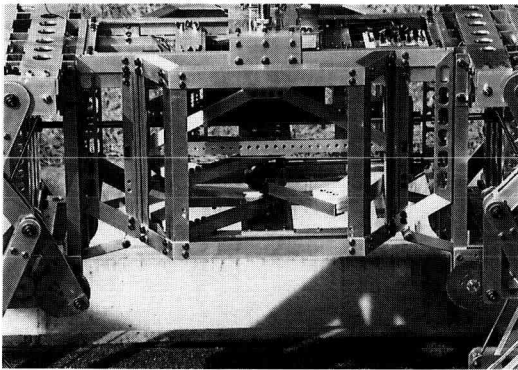


Photo 4-1. Dynamic control mechanism for center of gravity

Table 4-1. Specification of the quadruped machine

length	680.0 [mm]
width	409.0 [mm]
height	520.0 [mm]
weight	22.0 [kg]
stride	250.0 [mm]
max. speed	380.0 [mm/s]

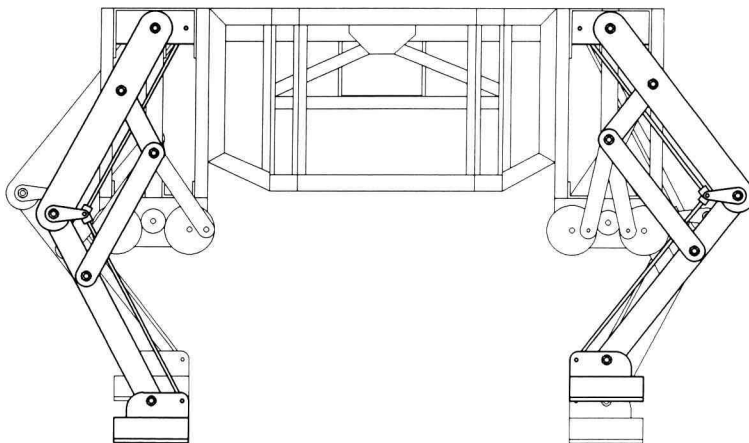


Fig. 4-3. General view of the quadruped machine

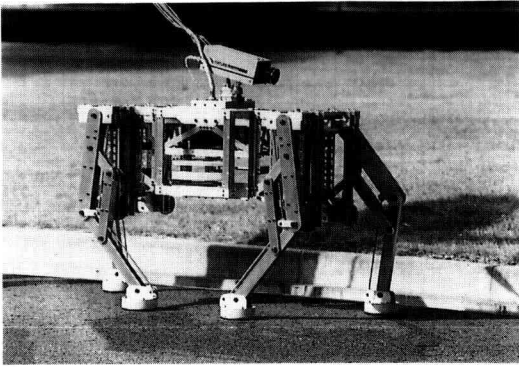


Photo 4-2. General view of the quadruped machine

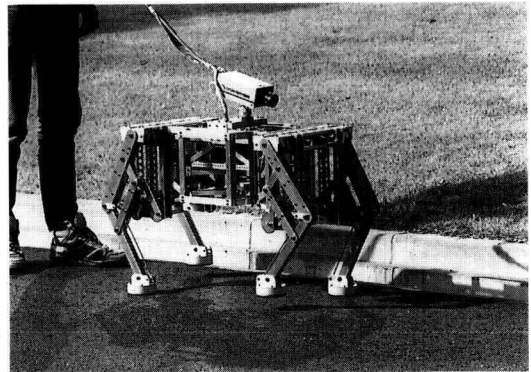


Photo 5-2. The quadruped machine in walking (2)

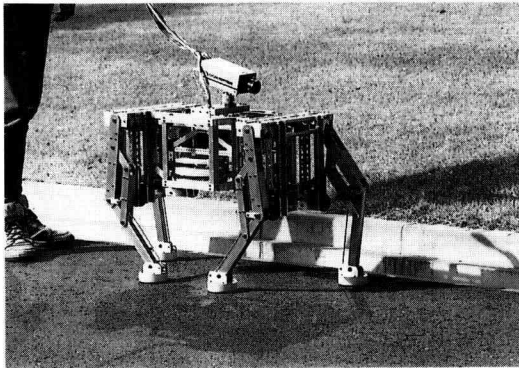


Photo 5-1. The quadruped machine in walking (1)

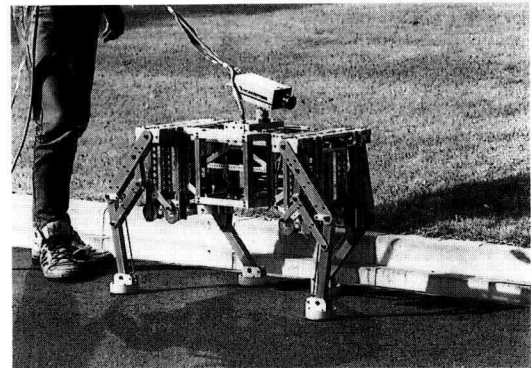


Photo 5-3. The quadruped machine in walking (3)

5. 試作歩行機械の基本動作

本歩行機械が所期の目的を満たしているかを検証するための実験を行った。

各脚の改良チェビシェフリンク機構の位相をトロット歩容を行うに適したものに合わせる。また、これに同期させた重心制御機構の位相もこれにあわせて設定する。次に整備台の上で歩行用モータを駆動して脚および重心制御機構の同期を確認した上で本機を床に降ろし歩行を行なう。なお、動的歩行と本機の特性上、低速である加速時及び減速時には倒れ込みが大きいので人による補助を行なう (Photo 5-1~5-4 参照)。

実験の結果、連続した動的歩行が可能であり、比較的揺動が少なく安定した歩行が行え、歩行速度は、約 0.9 から 1.3 km/h で安定した歩行が可能であること

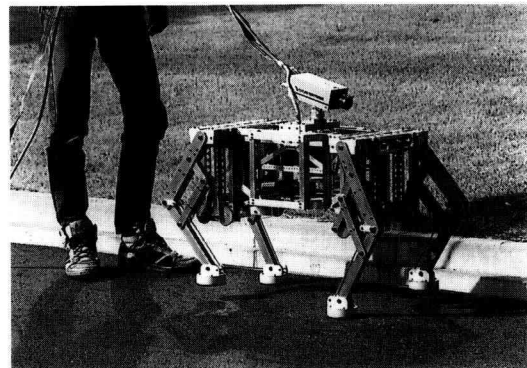


Photo 5-4. The quadruped machine in walking (4)

を確認した。

次に、重心制御機構の効果を確認するために各脚の位相をトロット歩容にしたままで重心制御機構の重りを前後に固定して歩行実験を行なった。この実験においても加減速時には人による補助を行なう。

実験の結果、連続した動的歩行は行なえるものの、歩行時における揺動が大きく、また比較的安定した歩行を行える速度は、約 0.6 から 0.7 km/h であり重心制御機構の効果を確認した。

6. 結論及び今後の課題

改良チェビシェフリンク機構とパンタグラフ機構および重心制御機構を用いることにより、回転対偶だけで動的歩行を行う歩行機械を構成することができた。この試作歩行機械により以下のような事項が確認された。

(1) 重心制御機構を積載することにより複雑な制御でなく機構のみで機体重心の移動と慣性力による動的安定を実現でき、揺動の少ない動的歩行が実現できた。

(2) 試作した歩行機械では重心制御機構を用いなくても歩行可能ではあるが、重心制御機構により安定なトロット歩行を行える速度の領域が広くなるとともに、より高速な歩行が可能であった。

なお、本研究、特に歩行機械の製作には本研究室の卒業研究生金子実喜夫君、宮田雅章君の協力によって行なわれた。記して感謝の念を表わしたい。

参 考 文 献

- 1) 田口 幹：6 脚歩行機械の研究，神奈川工科大学

研究報告 B 理工学編，p. 123/133 (1990)

- 2) 木村 浩，下山 勲，三浦宏文：四足歩行ロボット Collie-1 の制御，第 3 回日本ロボット学会学術講演会予稿集，p. 409/410 (1985)
- 3) 広瀬茂男，他：無線式 4 足歩行ロボットの試作開発，第 4 回日本ロボット学会学術講演会予稿集，p. 381/382 (1986)
- 4) 安達弘典，小谷内範穂，他：自由歩容形 4 脚移動ロボットの開発，第 6 回日本ロボット学会学術講演会予稿集，p. 319 (1988)
- 5) 細田祐司，服部 誠，藤江正克，菅 和俊，榊原義宏：4 脚歩行機械の開発(3)，第 6 回日本ロボット学会学術講演会予稿集，p. 307/308 (1988)
- 6) 佐野明人，古荘純次：点支持型四足歩行ロボットの三次元動的制御に関する実験的研究，日本機械学会論文集 (C 編)，p. 3014/3018 (1989)
- 7) 金子 真，阿部 稔，西沢昭一郎：疑似直線機構を用いた 6 足歩行機械に関する研究，第 1 回日本ロボット学会学術講演会予稿集，p. 125/126 (1983)
- 8) 金子 真，阿部 稔，谷江和雄：疑似直線機構を用いた 6 足歩行機械の研究(第 3 報)，第 2 回日本ロボット学会学術講演会予稿集，p. 31/32 (1984)
- 9) 小谷内範穂，中野栄二，安達弘典：階段登降可能な固定歩容形 6 脚移動ロボットの開発，第 3 回日本ロボット学会学術講演会予稿集，p. 255/256 (1985)
- 10) 秋園純一，岩崎峯夫，高橋英俊，梅谷登志文，麻山和正，他：歩行式水中調査ロボットの開発，第 3 回知能移動ロボットシンポジウム予稿集，p. 31/36 (1986)
- 11) 飯田 均，岡田 敏，穂積久士，中山良一，岡野秀晴：6 脚式歩行ロボットの開発，第 5 回知能移動ロボットシンポジウム資料，p. 21/24 (1990)