四足壁面移動ロボット NINJA-1 の開発*

広瀬 茂 男^{*1}, 長久保 晶彦^{*2}, 外山 良成^{*3}

Machine That Can Walk and Climb on Floors, Walls and Ceilings

Sigeo HIROSE, Akihiko NAGAKUBO and Ryousei TOYAMA

The configurational design for a wall-climbing robot which is capable of moving on diversified surfaces of wall and has high payload capability, is discussed, and a developed quadruped wall-climbing robot, NINJA-1, is introduced. NINJA-1 is composed of 1) legs based on a 3D parallel link mechanism capable of producing a powerful driving force for moving on the surface of a wall, 2) a CP (Conduit-wire-driven Parallelogram) mechanism to adjust the posture of the ankles, and 3) a VM (Valve-regulated Multiple) sucker which can provide suction even if there are grooves and small differences in level of the wall. Finally, the data of the trial-manufactured NINJA-1, and the up-to-date status of the walking motion are shown.

Key Words: Quadruped Wall-climbing Robot, VM Sucker, 3D Parallel Link Mechanism, CP Mechanism

1. はじめに

高層ビルや各種プラントの外壁面の保守点検, 建設土木作業の補助, 高層ビル, マンションの消防や救助活動の援助など, 高所壁面での危険作業を人間に代わって行う壁面移動ロボットの開発が現在強く望まれている。壁面移動機構としては, これまで吸盤と車輪やクローラを組合せた方式, 簡単な脚機構を有する壁面移動方式などが提案され開発されている^{(1)~(5)}。しかし, これらは連続したほぼ平坦な壁面か, あるいは壁面から天井などの限定された環境での移動しかできていない。上述するような作業を行う移動ロボットは, 床から壁面, 壁面から天井, さらに北の壁面から東の壁面などへの動作, また壁面上に敷設された配管などの障害物を乗り越える動作などができなければならない。さらにこのような多様な運動性能と同時に, 機構が軽量であり十分余裕をもって吸着移動できる性能を持たなければならない。

上述のような機能を達成するため, 著者らは干渉駆動の原理に基づき, 軽量で強力な推進力を生成できる脚機構(3D 並行リンク機構), 蛇管を使用し空間平行姿勢保持を行う足首機構(CP 機構), そして溝や小さな段差があっても吸着不能にならない調整弁付多孔式吸盤(VM 吸盤)などを新たに開発し, それらを用いて四足壁面移動ロボット NINJA-1 を試作した。本論文は NINJA-1 の機構設計について論ずる。そして, NINJA-1 の諸元とその基本的な歩行運動実験の様子を最後に述べる。

2. 全体システムの設計

壁面上で高い適応性, 安定走行性, そして積載性能を生成する壁面移動ロボットを構成するためには, その形態を十分慎重に選択しなければならない。本章では全体的な形態設計についての検討を行う。

2.1 吸着移動方式の選定 対象とするロボットは, 非磁性体の壁面で移動することを想定している。この場合, 吸着力の生成には空気を負圧を利用することが最も一般的である。吸着しながら移動する機構としては, これまでも例えば負圧発生用吸盤の内部に車輪を設け, あたかもホバークラフトを逆にしたような構成の移動装置が試作されている⁽¹⁾⁽²⁾。この移動装置

* 平成2年6月15日 知能移動ロボットシンポジウムにおいて講演, 原稿受付 平成2年11月26日。

^{*1} 正員, 東京工業大学工学部(〒152 東京都目黒区大岡山2-12-1)。

^{*2} 東京工業大学大学院。

^{*3} 石川島播磨重工業(株)(〒135 東京都江東区豊洲3-1-15)。

は速く動き回るのに適する。しかし、この方式では吸盤と本体との間に間げきができやすく、壁面が十分平坦でなければならない。また、負圧吸盤で構成されたクローラによる移動装置も試作されている⁽³⁾。これは確実な吸着力を生成するが、方向転換が難しいことや、段差では吸着力が低下するといった問題を残している。

足先に吸盤を装備した脚を使用する吸着歩行方式は、運動速度を上げにくいという大きな欠点を有するものの、以下のような特徴を有する。

- (1) 脚の自由度を使用することで、凹凸のある壁面に適応した移動や全方向移動ができる。
- (2) 吸盤を壁面に密着させた状態を保持しながら移動できるため、強い吸着力を常時維持できる。
- (3) 壁面に吸着した状態で静止作業する場合、移動のための足が搭載したロボットアームのための足場になる。さらに、脚の能動自由度を利用することによって、マニピュレーション作業を補助することもできる。

これらの特徴は、本研究が目的とする壁面移動ロボットに適する。そのため、吸着移動方式としては歩行を選択することにする。

2.2 脚の本数 歩行方式を選択した場合、次に重要なのは脚の本数の選択である。本論文では4脚を選択する。その理由は以下のとおりである。

高い対壁面適応性を発揮するため脚には3自由度以上が必要である。ただし1脚では壁面歩行はできない。2脚だと1脚支持状態で移動できるが⁽⁴⁾、図1(a)のように側部に足を延ばす姿勢では吸盤に大きなモーメントが働き落下しやすい。3脚では2脚支持状態で移動できるが、側方に移動する途中図1(b)のような姿勢がやはり生じてしまい落下しやすい。これらに対し、4脚あれば3脚支持状態で歩行でき、吸盤にモーメントを生成しない歩行運動が実現できる。一方、軽量化

のためには脚本数はできる限り少ないほうがよい。以上の点で4脚が適当であると思われる。

3. 脚機構の構成

3.1 干渉駆動による設計 脚の自由度は、軽量化のため足先を任意の位置に運ぶために最低限必要な3自由度に設定する。脚のための3自由度駆動系を構成する機構はいろいろ考えられる。ここでは著者らがすでに提案した「干渉駆動 (Coupled Drive) ⁽⁶⁾」の概念に基づいて機構設計を行うことにする。

干渉駆動とは以下のような考え方である。実用的なロボットシステムを構成しようとする、通常ロボットの自由度はできる限り制限し、最低限の機能しかないが軽量であるように駆動系を設計する。しかし最も望ましい設計は、望みの機能を発揮する十分多くの自由度を有しながら、同時に軽量化できることである。干渉駆動とは、ロボットに搭載されている自由度を常にできるだけ相互に干渉して駆動するような機構および制御法を選択し、そうすることにより上述の特性を実現しようとする設計原理である。干渉させるということは、別の言い方をするとアクチュエータを互いに協力し合わせ、全アクチュエータをできるだけ常時作動した状態に保持することを意味する。こうすると各自由度に装備すべき最大出力パワーは低くてよいことになり、その結果ロボット全体の軽量化が可能になるのである。なお、干渉駆動系を非干渉化して制御することは、たとえ駆動系のダイナミクスを考慮したとしても現在の計算機技術によれば十分可能である。そのため実施上の障害はすでに除去されていると考えられる。

干渉駆動を使用した設計法の有効性を明確化するため、壁面移動ロボットの動作を例にして、従来の設計法との比較を行ってみることにする。一般に壁面移動ロボットは重力に逆らう鉛直方向の移動に大きな駆動

図1 脚数と吸盤にかかるモーメントの関係

図2 脚機構と干渉の効果

力を必要とする。そして、水平方向の移動にはそれほど駆動力を必要としない。このような作動条件を考慮した従来の脚駆動系設計の一例を図 2 (a) に示す。これは上下運動を大形で強力な直動アクチュエータ a で駆動し、横方向運動を小形のアクチュエータ b で駆動するものである。

これに対し、干渉駆動の立場でこの脚駆動機構を設計すると、例えば図 2 (b) のように鉛直に 2 本の直動アクチュエータを配置した機構となる。

以下に、図 2 (a), (b) の差異を定量的に比較しよう。(b) の 2 本の直動アクチュエータは、それぞれの出力パワーが (a) のアクチュエータ a の半分ででも、同時に駆動する (干渉駆動する) ことで垂直方向にアクチュエータ a と同じ出力を生成する。DC モータの駆動システムの場合、出力パワーと重量はほぼ比例する⁽⁷⁾。そのためアクチュエータ a とこの 2 本の直動アクチュエータはほぼ同じ重量で設計できる。一方 (b) の 2 本の直動アクチュエータは、それぞれをきつ抗的に干渉駆動することでアクチュエータ b が行う運動、つまり脚を左右に振る運動ができる。そのため (b) の干渉駆動形脚機構はアクチュエータ b を必要としない分 (a) の機構より軽量化できる。このように、干渉駆動機構の有効性は明らかである。

3.2 3D 並行リンク機構の導入 干渉駆動の考え方を実際の脚機構に導入するため、図 2 (b) の機構を三次元に拡張することにする。この場合、脚を駆動する直動アクチュエータには曲げモーメントがかからないような構造としなければならない。これは、直動アクチュエータが曲げモーメントを支持せねばならない場合、駆動軸の剛性を上げねばならず重量的に不利となるからである。

直動アクチュエータ軸に曲げモーメントが生じず、なおかつ干渉駆動の効果を持つもっとも単純な機構は、図 3 (a) に示すような平行リンク機構であろう。この機構ならば駆動軸には伸縮力のみがかかり、曲げモーメントを支持せずにすみ重量を軽くできる。

図 3 3次元平行リンク機構

ところが、このような機構では足首の関節に三つの回転自由度が P 点に集中してしまう。通常の機械要素では三つの回転自由度を 1 点に集中することは困難である。3 本の直動アクチュエータを仮想的に 1 点に集める特別の機構がマニピュレータ用として提案されたこともあるが⁽⁹⁾、この機構は複雑で重く脚機構には適さない。

そこで我々は、実際の脚機構として図 3 (b) のような機構を導入することとした。この機構は、まず足先構造 F を回転が拘束され伸び縮みのみを行うスプラインシャフト S に固定し、スプラインシャフト S の根元側を胴体部にユニバーサルジョイント J で連結する。そして 3 本の直動アクチュエータ A を、足先構造 F の三つの異なる支持点と胴体部との間にユニバーサルジョイントあるいはボールジョイントで架設するという機構である。以降これを「3D 並行リンク機構」と呼ぶ。

3D 並行リンク機構は、3 本の直動アクチュエータ A がお互いに離れた位置で足先構造 F を駆動し、直動アクチュエータ同士は接触し合わないように構成されている。このような構成であるため、3D 並行リンク機構の足先に外力が働いた場合、足先構造 F には曲げモーメントが生ずる。しかし、この曲げモーメントはすべてスプラインシャフト S が負担する。そのため、3 本の直動アクチュエータ A は単純な伸縮力のみを生成するだけでよい。3D 並行リンク機構は、足先構造 F の姿勢が足先の位置に連動して変化する。しかし、この姿勢は位置に従属して決定され、この関係は機構的に固定されている。そのため、3 本の直動アクチュエータ A の長さを制御すれば、足先構造 F の位置が一意に決定される機構となっている。

なお、実際の脚機構においては図 3 (b) に示すように、図 2 (b) と違って直動軸が平行になっていない。これは、脚先端の位置による直動アクチュエータの平行度の変化を均一化し、脚の可動範囲、操作性を最適化するためである。

NINJA-1 が最大のパワーを必要とする垂直壁面上を鉛直方向へ上昇を行う場合を考える。この際図 12 のように各脚の脚線が鉛直方向に沿うような姿勢をとらせる。こうすると、デューティ比 0.75 の歩容においては、12 本の直動アクチュエータのうち接地する 3 脚における 9 本の駆動力のほぼ総和により上昇運動ができるため、干渉駆動の効果が最も発揮しやすくなる。

また、3D 並行リンク機構の可動範囲は図 4 のように広くとれる。そのため今後考察してゆく歩容制御によって、図 8 のようないろいろな状況での壁面移動も実現可能であると考えられる。

なお、上述した図3(a)の機構は直動アクチュエータを6本にするとスチュワートプラットホーム⁽⁹⁾となる。スチュワートプラットホームでは、干渉する駆動軸数がさらに多くはるかに大きな干渉駆動の効果が発揮される。スチュワートプラットホームに干渉駆動の効果があることは、従来特に指摘されたことがないと思われる。しかし、重いフライトシミュレータ等を駆動するのにスチュワートプラットホームがよく使用される理由は、垂直方向に干渉駆動される効果を利用したものであるということをここで明確化しておく。

3.3 足先空間姿勢調整のためのCP機構の導入

3D並行リンク機構の足先姿勢を望みの方向に保つ機構を導入する。重量的な制限を考慮すると、アクチュエータを用いた能動機構の使用は明らかに望ましくない。そのため機構的制御法を考えることにする。さて、吸盤を用いた壁面移動では、足先吸盤の空間姿勢は通常つねに壁面に密着できる方向とすべきである。一方、このときの胴体の底面は壁面と平行になっている。このことから、通常の壁面移動では足先吸盤の空間姿勢は胴体と常時平行に保てればよい。

図4 3D並行リンク機構の可動範囲

図5 従来の平行姿勢保持機構

ただし、3D並行リンク機構は伸縮運動を行う。従来このような伸縮する部材間の空間平行姿勢保持機構はほとんど考察されていない。

このための機構としてすぐ考えられるものとしては、たとえば図5(a)のようなパンタグラフ機構がある。しかしこれを三次元機構に拡張しようとする、各関節はボールジョイントやユニバーサルジョイントで構成しなければならず複雑で重くなってしまう。また占有空間も大きくなる。図5(b)のような油圧シリンダで連結する構成も考えられる。しかし、十分小形で摩擦の少ない油圧シリンダがまだ得難いため、この機構は大型の装置にしか使用できない。

したがってここでは、蛇管(conduit wire)を使用した新しい平行運動機構である「蛇管平行運動機構(Conduit-wire-driven Parallelogram Mechanism, 省略してCP機構)」を新たに提案する。CP機構は次のような原理で作動する。

図6のような平面機構をまず考えよう。この直動シリンダが距離 x だけ伸展するとABの間隔は距離 x だけ減少する。もしも胴体と足先が平行に保たれるのであれば、2点MNの間隔は距離 x だけ増大する。つまり胴体と足先を平行に保つ条件は、

$$AB + MN \dots\dots\dots (1)$$

を一定に保つことであるといえる。そのためBからMまでをチューブで連結し、ワイヤーをAからBM間のチューブを通してNまで張る。こうすると、ワイヤーおよび蛇管の伸縮がない限り、足先が伸び縮みしても前述の式(1)の関係は常時保たれる。つまり、四角形OMNPは平行四辺形となり足先は胴体と平行になる。

この機構ではスプリングの効果でワイヤーに張力を与えているが、この機構を左右に2組使用すれば足先は

図6 CP機構の基本構成

剛に平行を保持できる。さらにこの機構を3組以上使用すれば、空間運動を行うときにも足先姿勢は常時胴体と一致できる。もちろんワイヤ2本を例えば90度間隔で配置し、他方をばねで引けばこれだけでも空間平行姿勢は実現できる。このように提案するCP機構は著しく単純で軽量である。そのため、壁面移動ロボットの足先姿勢の拘束機構に適すと考えられる。

なお、このような機構で足首の平行性維持が固定的に行われると、図9のように壁面の方向が変わる環境での移動はできなくなる。このような環境でも適応性を生ずるための一つの方法は、吸盤を支持する足首にコンプライアンスを与えることであろう。コンプライアンスがあると、吸盤が方向の違う壁面に接したときでも、吸盤を壁面に押付ける動作を行うことによって吸盤を壁面に密着でき、吸着歩行運動が持続できると考えられるからである。足首機構にコンプライアンスを与えるための具体的な機構の構成は、実際の試作機の例で説明することにする。

3・4 試作した脚機構の構成 実際に試作した脚機構を図7に示す。胴体BにユニバーサルジョイントJで連結されたスプラインシャフトSには足先構造Fが固定されている。試作した脚では、このスプラインシャフトSとしてスプラインの代わりに四角の角材を摺動させる機構を使用している。胴体Bと足先構造Fの間には3本の直動アクチュエータ A_1 , A_2 , A_3 が連結されている。吸盤Vは足先支持構造Bに対して軸 A_1 と軸 A_2 から構成されるジンバル構造で支持されている。吸盤Vは一对のCP機構と、それぞれのワイヤを常時伸展する方向に張力を与える軸 A_2 に装備したスプリング S_1 によって、常時胴体と同一の方向を向くようになっている。

吸盤Vを支持する足首のコンプライアンスは軸 A_2 回りには、スプリング S_1 とワイヤの他端に装備するスプリング S_2 によって生ずる。また軸 A_2 と直交する方向のコンプライアンスは軸 A_3 により実現している。

図7 試作機 NINJA-1 に使用した脚機構

4. 弁付き多孔式吸盤 (VM 吸盤) の導入

従来試作された壁面移動ロボットでは、吸着機構にはあまり詳細な検討がなされず、ほとんどは単純な吸着カップを使用していた。しかし、吸盤は壁面移動機構の積載性能を決定的に支配するものであり、著しく重要な要素である。例えば、従来の吸盤では吸着盤の一部に溝や凹凸などがあると、そこから空気が流入し吸着力が著しく低下する。このような問題は、一つの吸着ユニットを多数の小吸盤で構成しそれらをできるだけ独立に駆動することで発生しにくくなる。たとえ多数の吸盤のうちのいくつかが空気の流入（リーク）を起こし吸着力が低下したとしても、ある数以上の吸盤が吸着力を維持できれば、その吸着ユニットは全体として有効に働くからである。

このような複数吸盤を用いる先駆的な研究としては電磁弁切換え方式⁽¹⁰⁾が挙げられる。しかし、この方法では吸盤全体の重量が大きくなってしまいう問題があった。このような問題を解決するために、著者らは空気のリークを調整する弁を有する多孔式吸盤である「VM 吸盤 (Valve-regulated Multiple Sucker)」をすでに提案した⁽¹¹⁾。

VM 吸盤は図 9 に示すような、負圧ポンプにつながる共通空洞に設けられた連結孔 H を介して連結された複数の小吸盤と、連結孔 H に装備された調整弁 R から構成されている。この調整弁 R は、弱いばね性を持ち通常は開いた状態となっている。

図 9 のように溝のある壁面に接して空気を吸引する場合、壁面に密閉した小吸盤では、その小吸盤の連結孔 H を通過する空気の流れは弱い。よって調整弁 R は閉じず吸着力が生成される。しかし、溝などに接し密閉されない小吸盤の連結孔 H では、多量の空気が吸い込まれる。そのため、この小吸盤の調整弁 R は空気に流され閉じることになる。つまり、吸着力を生成できる小吸盤は働き、空気が漏れる小吸盤は密閉して全体の負圧度の低下を防ぐという機能が自動的に実行されるわけである。したがって VM 吸盤は壁面に若干の凹凸や溝があっても吸着力を生成できる特性を有し

ている。

なお、この調整弁 R は通常の精度で製作すると密閉時にも若干空気が漏れる。この空気の漏れを利用すると、VM 吸盤が浮上しており負圧ポンプが働いてすべての調整弁 R が閉じていても、この VM 吸盤を壁面に接触させるとそのまま吸盤として利用できるという特性も有している。壁面に接し密閉状態になった小吸盤の負圧度は次第に上昇し、その小吸盤の調整弁 R が自動的に開くからである。試作した VM 吸盤では、この特性を積極的に利用し、負圧生成電磁弁の駆動シーケンスの簡略化を計っている。

これらの考え方に基づいて新たに試作した吸着ユニットを図 10 に示す。従来の試作吸盤ユニットでは、小吸盤それぞれにベローズを使用した。今回試作した吸着ユニットでは 192 mm×238 mm のネオプレンスポンジに $\phi 38$ mm の孔を 20 個設け、新たに一体成形された構成を導入することにより軽量化を実現している。調整弁 R には薄い焼青銅板を使用した。また、一般に使用されている建築壁面における吸着実験を行った。溝のない試験壁面上の場合の吸着力の測定値を表 1 に示す。溝がある壁面上での実験も行ったが、溝にあたる小吸盤の調整弁 R が確実に閉塞し、吸盤全体としての負圧度が上昇しほぼ作動小吸盤数に比例する吸着力を生成することが確認できた。

なお、小吸盤周辺のスポンジ材質は密閉性を高めるため柔らかいほどよい。しかし自重などを支持するためのせん断力がこのスポンジ部に直接働くと、柔らかいスポンジは破断してしまう。そのため、試作した吸盤では図 11 のように支持力を作意的に高さ H の点で受ける設計をしている。そして、吸盤中央部のスポンジは柔らかくし、吸盤の周辺部のみを硬質のゴムで囲む構成とした。このような吸盤構成を導入することに

表 1 建築壁面での吸着実験結果

Wall Types	Sucking Force(N)	Vaccum(-mmHg)
Concrete	970	500
Mortared Wall	1480	500
Tile	1558	520
Sprayed Paint	559	500

図 8 壁面環境での適応的な移動

よって、支持力によるせん断力は吸盤の周辺部の硬質ゴムで選択的に支持され、柔らかいスポンジ部分には垂直方向の引きはがし力のみが働き、吸盤の耐久性が向上できた。

5. NINJA-1 の歩行実験

試作した四足壁面移動ロボット NINJA-1 により基本的な歩行実験を行った。NINJA-1 の仕様を表 2 に示す。行った実験は地上での側向歩容⁽¹²⁾による全方向移動、垂直壁面での全方向移動である。その様子を図 12 に示す。無負荷時における脚の垂直方向と水平方向の速度はそれぞれ 0.15 m/s, 1 m/s である。しかし、脚の切換えにある程度時間がかかるため、垂直方向の平均移動速度は 0.02 m/s, 水平方向には 0.1 m/s 程度であった。また、足先に装備した三軸力センサはまだ使用しておらず、歩行は単なるシーケンシャル動作であるがその基本性能として十分安定な壁面歩行が実現できることを確認した。歩行のための制御法の構成、実験結果の詳細は別報で報告する。

図 9 VM 吸盤の構造

図 10 試作した VM 吸盤

6. ま と め

壁面から天井などの多様な壁面環境を全方向的に移動でき積載性能の高い壁面移動ロボットの形態と機構の設計を論じ、四足壁面移動ロボット NINJA-1 を新たに開発した。NINJA-1 は、(1)壁面移動で強力な推進力を生成できる 3D 並行リンク脚機構、(2)蛇管を使用する足首姿勢調整用の CP 機構、そして(3)溝や小さな段差があっても吸着不能にならない VM 吸盤などを装備したことを特徴とする歩行形壁面移動ロボットである。最後に試作した NINJA-1 の諸元とその基本的な歩行運動実験の様子を示した。

表 2 NINJA-1 の諸元

Dimension	500×1800×400 mm (Posture of photo.2)
Mass	45 kg
DC motor	SHINANO ELEC.CO. 4DA04-2DD 40W 12units
Maximum speed	0.16 m/sec
Maximum stroke	200 mm (Shaft length 470-670)
Vertical axis thrust force	4000 N
Horizontal axis thrust force	500 N
Vertical axis speed	0.15 m/sec
Horizontal axis speed	1 m/sec
Sucking force	1500 N/leg (On flat iron plate)

図 11 周辺部硬質ゴムによるせん断力の選択的支持

図 12 垂直壁面における歩行実験

本論文は NINJA-1 の機構設計を論じた。しかし、NINJA-1 が有する運動性能を最大限引き出すには、独特な形態の脚機構制御法、壁面歩行特有の歩容制御法、脚可動範囲の限界を考慮した凹凸壁面での適応的歩容生成法、そして足先力センサからの情報を利用した支持力の最適配分制御法など制御上の多くの問題の検討が必要である。今後はこれらについて順次考察し

てゆく予定である。

文 献

- (1) Sato, K., Fukagawa, Y. and Tominaga I., Inspection Robot For Tanks Wall In Nuclear Power Plant, *Proc. Int. Topical Meeting on Remote Systems and Robotics in Hostile Environments*, (1987), 177-181.
- (2) 長塚, 真空吸着自走車「ボックス」, *Robot*, 53 (1986), 127-135.
- (3) Ikeda, K. and Nozaki, T., Fundamental Study On A Wall-Climbing Robot, *In Proceedings of the 5th Int. Symp. on Robotics in Construction*, (1988), 449-458.
- (4) Nisi, A., Bipedal Walking Robot Capable Of Moving On A Vertical Wall For Inspection Use, *In Proceedings of the 5th Int. Symp. on Robotics in Construction*, (1988), 581-588.
- (5) Kroczyński, P. and Wade, B., The Skywasher: A Building Washing Robot, *In Proceedings of the 17th Int. Symp. on Industrial Robots*, 1 (1987), 11-19.
- (6) Stewart, D., A Platform with Six Degree of Freedom, *Proc. I. Mech. Eng.*, London, 180-1-15, (1965-66), 371-386.
- (7) Hirose, S. and Sato, M., Coupled Drive Of The Multi-DOF Robot, *In Proceedings of the 1989 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, (1989), 1610-1616.
- (8) Hirose, S., Ikuta, K. and Umetani, Y., Development of Shape Memory Alloy Actuators. Performance Assessment and Introduction OF A New Composing Approach, *Advanced Robotics*, 3-1 (1989), 3-16.
- (9) Tohrnton, G. S., The GEC Tetrabot-A New Serial-Parallel Assembly Robot, *In Proceedings of the 1988 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, (1988), 437-439.
- (10) 池田・野崎, 壁面検査ロボット用走査型吸盤に関する基礎的研究, 第3回日本ロボット学会学術講演会予稿集, (1985-11), 433-434.
- (11) 広瀬, 壁面移動ロボット用吸着機構の開発, *Robot*, 54, (1986), 53-57.
- (12) 広瀬・福田・菊池, 四足歩行機械の制御システム, 日本ロボット学会誌, 3-4 (1985), 46-66.