

壁面歩行ロボット

Wall Walking Vehicles

高層ビルや大形タンク外壁の清掃・塗装あるいは検査などの高所作業を、人間に替わって代行できるロボットの開発が望まれている。このような壁面作業ロボットの実現を目指して、壁面に吸着しながら移動のできる壁面歩行ロボットを試作した。試作したロボットは、壁面への吸着手段として真空吸着盤を用いる方式と永久磁石を用いる方式の2種類である。いずれの方式も、吸着する手段をもつ脚を壁面から上下する動作と脚を相互に移動する動作を組み合わせる壁面上の歩行を実現する。天井面あるいは垂直壁面でこれら試作ロボットの動作試験をした結果、いずれの方式も安定な歩行動作のできることを確認できた。

出海 滋* Shigeru Izumi
 佐藤主税* Chikara Satô
 内藤紳司* Shinji Naitô

1 緒 言

垂直な壁面やオーバハングした壁面を移動しながら、各種の作業ができるロボットは広い応用分野がある。例えば、

- (1) 石油タンク、ガスホルダ、大形圧力容器などの溶接線の探傷検査や塗装作業
- (2) 高層ビルの外壁清掃作業
- (3) 船舶の清掃・塗装作業
- (4) 電力プラントの復水器やボイラの清掃・点検作業

などが適用対象となる。

これらの作業は宙づりのゴンドラ、あるいは足場の上に作業員が乗って実施しているのが現状である。足場を構築する費用や作業コストの低減、あるいは作業時の安全性を確保する観点から、これらの作業をロボットが代行することが望ましい。壁面での作業ができるロボットを実現するには、壁面に吸着し、目的に応じた各種の作業機械を搭載して壁面を自由に動き回ることのできる壁面移動機構を開発しなければならない。壁面移動機構に関しては幾つかの報告例がある^{1),2)}が、まだ技術的に未完成で実用化には至っていない。この論文では、真空吸着盤あるいは永久磁石により吸着する方式の壁面歩行ロボットに関し、その試作した結果について述べる。

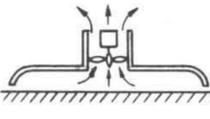
2 壁面歩行ロボットの構造

2.1 壁面移動機構の方式

壁面を移動する機構には、壁面に吸着する手段と移動する手段が必要である。吸着手段としては真空吸着式と磁気吸着式が一般的である。真空吸着方式は、大気圧により壁面に押し付ける力を移用するものであり、複数個の真空吸着盤を用いる分散形と、ロボット全体を大きな真空パッドで囲んで排気ファンにより内部の空気を排出して発生する負圧により吸着する集中形がある。分散形は小形・軽量化が容易で吸盤と壁面との着脱も容易である反面、壁面に凹凸があると真空漏れで吸着力を失うなどの問題がある。集中形は、排気風量を大きくすれば、壁面の凹凸による多少の空気漏れは問題にならず、車輪やクローラなどの連続的な移動方式と組み合わせることが容易である。しかし、排気のために大きなパワーを必要とし、また吸着機構に冗長性がないため、空気漏れ量があったら限界を越えると吸着力を失い落下する危険性がある。磁気吸着方式は永久磁石式と電磁石式がある。永久磁石

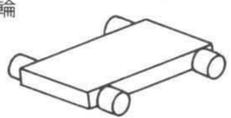
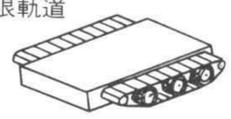
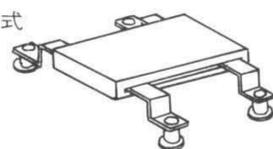
式の最大の特長は、吸着を維持するためにエネルギーを必要としないことであり、電源喪失に対し本質的に安全である。しかし、吸着力を変化できないために、磁石を壁面から着脱するのに大きな力を必要とする。電磁石式は、壁面からの着脱が容易である反面、重量が大きいかつ吸着を維持するために常に電力を消費しなければならない。これら各方式の特長と問題点をまとめると表1に示すようになる。壁面を移動する方式には、車輪による走行、無限軌道(履帯、すなわちクローラ)による走行、脚による歩行などがある。歩行方式に比較すると車輪や無限軌道による走行方式は、連続的でスムーズな移動ができ、制御が簡単で移動速度も速くできる。しかし、集中形の真空吸着方式以外の方式では、車輪又は無限軌道自体が吸着能力をもたなければならない。分散形の真空吸盤方式と車輪や無限軌道による走行方式を組み合わせることは困難であり、真空吸盤方式では歩行方式を用いることになる。円筒形の永久磁石を車輪として用いるか、あるいは無限軌道の接地面に永久磁石を用いることで、磁気吸着式で走行形のロボットが実現できる。しかし、磁気車輪は接地面積が大きくできないため十分な吸着力を得ることが難しい。また無限

表1 壁面への吸着方式とその特長 分散形真空吸着方式と永久磁石方式に関し試作した。

吸着方式	特長	問題点	
真空吸着	分散形 (吸盤形)	小形・軽量化が容易である。	壁面に凹凸があると、真空漏れを起こす。
	集中形 	凹凸面でのある程度の空気漏れは許容される。	吸着機能に冗長性がなく、いったん限界を越える空気漏れがあると全体の吸着能力を失う。
磁気吸着	永久磁石形	吸着力の維持にエネルギーを必要としない。	歩行時の磁石と壁面との着脱に大きな力を要する。
	電磁石形	磁石と壁面間の着脱が容易である。	吸着力の維持に電力が必要で、電磁石の重量も大きくなる。

* 日立製作所エネルギー研究所

表2 壁面移動ロボットの移動方式とその特長 吸着の確実性から歩行方式を採用した。

移動方式	特長	問題点
車輪 	移動速度が速い。操だなどの制御が容易である。	十分な吸着力を得ることが難しい。
無限軌道 	吸着面積を大きくできる。不整地面の走行ができる。	天井面で十分な吸着力が得られない。
歩行式 	確実な吸着力が得られる。	動作が間欠的で速度が遅い。

軌道の場合も、軌道の接地面のすべてが吸着力として利用できるわけではなく、天井面あるいはオーバハング状の壁面を移動する場合は、無限軌道の最前部と最後部だけが吸着力として利用できるにすぎない。歩行方式は、磁石又は吸盤の付いた複数の脚を交互に壁面に着脱しながら移動する方式であり、動作が間欠的になるため歩行方式に比較すると移動速度は遅くなる。しかし、吸着面積は必要に応じて広くでき、壁面移動機構で最も重要な吸着能力の点ではいちばん確実な方式である。これら移動方式を表2にまとめて示す。以上の吸着方式と移動方式の組み合わせの中から、確実な吸着力が得られる歩行方式を移動方法として採用し、吸着方式としては、吸着維持にエネルギーを必要としない永久磁石方式と小形・軽量化が容易な真空吸盤方式(分散形)の2種類の壁面移動ロボットを試作した。

2.2 真空吸着式壁面歩行ロボット

試作した真空吸着式壁面歩行ロボットの写真を図1に、その概略構造を図2に示す。このロボットは外側と内側のフレームにそれぞれ4個ずつの真空吸着盤を備えている。これら吸着盤の壁面からの脱着と、内外二つのフレーム相互間の平行移動又は回転運動により、ロボットの前後進移動と旋回動作ができる。フレーム相互の平行移動には空気シリンダを、

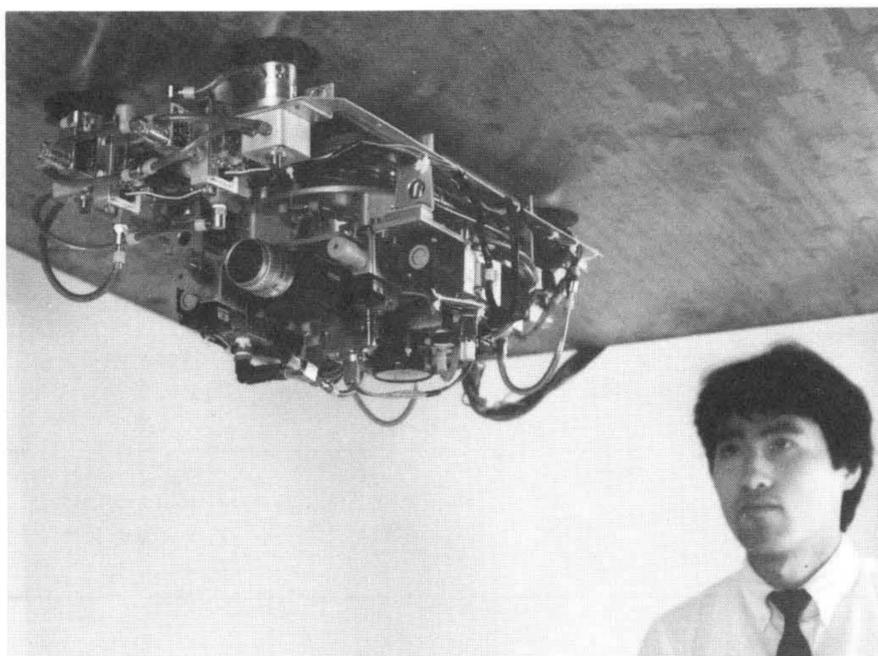


図1 真空吸着式壁面歩行ロボット 真空吸着盤により、壁面に吸着しながら天井面や垂直面を移動できる。

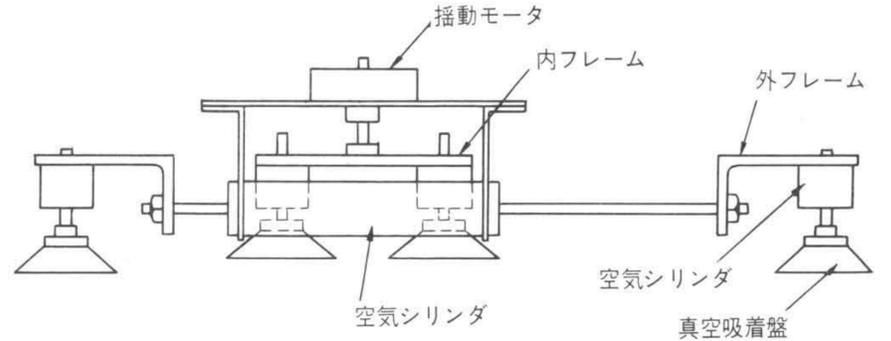
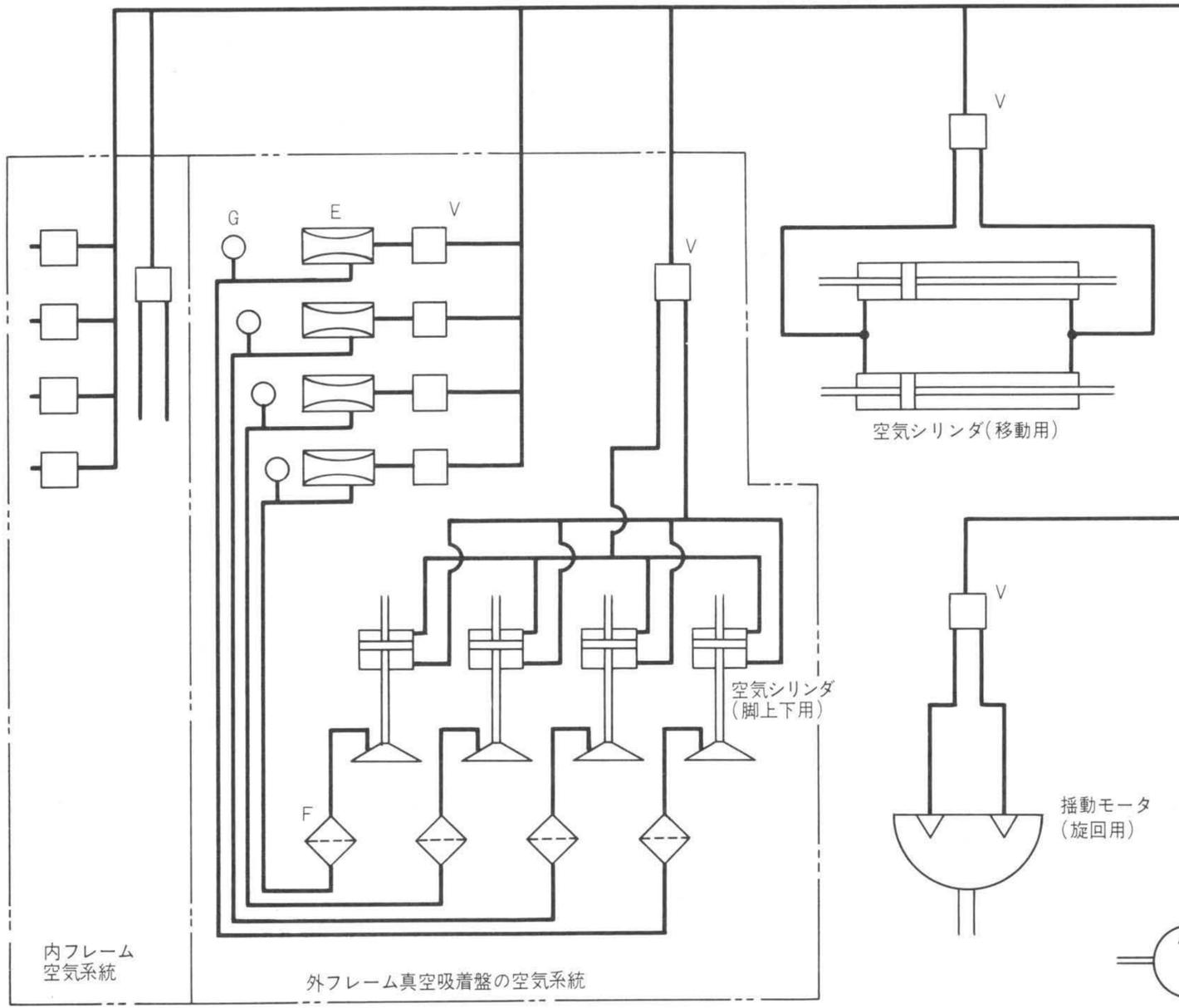


図2 真空式壁面歩行ロボットの構成 空気式のアクチュエータだけにより、移動動作を実現する。

回転運動には空気式揺動モータを使用している。また、吸着盤を着脱するときの吸着盤の上下動作にも空気シリンダを使い、更に各吸盤はエゼクタに空気を送ることで真空に保っている。すなわち、このロボットのすべての動作の駆動源は圧縮空気であり、これを1本のチューブで供給している。空気系統の構成を図3に示す。同図中のそれぞれの空気弁を適当なシーケンスで開閉することにより、吸着盤の着脱と前後進及び旋回動作ができる。8個の吸盤にはそれぞれ独立にエゼクタが備えてある。これにより、壁面上の異物やきずなどでいずれかの吸着盤に真空漏れが起こっても他の吸着盤にそれが波及することはなく落下が防止できる。また、各吸着盤に備えた真空度センサにより真空度を常時監視し、いずれかの吸着盤で真空漏れを発見した場合は移動動作を中断し、すべての吸着盤を吸着状態にして安全を確保している。

2.3 磁気吸着式壁面歩行ロボット

試作した磁気吸着式壁面歩行ロボットの外観を図4に、またロボット裏面の脚部の写真を図5に示す。図5に示すように、このロボットは本体フレームにボールねじを介して4本の脚が取り付けられている。脚は永久磁石により壁面に吸着するが、壁面への磁石の着脱動作と、ボールねじによる脚の送り動作を組み合わせることで壁面上の移動をする。この歩行の様子を図6に示す。このロボットでは4個の脚のうち少なくとも2脚は壁面に吸着した状態にする。歩行する場合は、対角線の2脚をまず壁面から引き離し、この状態で本体フレーム上での脚の位置を同図の②から③のように移動することになり、本体フレームが左方に移動する。この状態で壁面から離れていた脚を着地し、他の2脚を引き離して同様の動作をさせる。この歩行方法では、少なくとも2脚分の吸着力は確保できる。この方式のロボットでは永久磁石で吸着している脚をいかに壁面から引き離すかが問題になる。ここで試作したロボットの吸着力は、脚1本当たり1,300Nである。この吸着力に抗して脚を壁面から引き離すためのアクチュエータもさることながら、1本の脚を吸着力に抗して引き上げるときの反力を他の脚に受けもたせると、ロボット本体のフレームに大きな荷重がかかることになり、フレーム強度を保つために自重が増大する。ここでは各脚部を図7に示す構造にすることで、これらの問題を解決した。この脚構造では、永久磁石が壁面に密着した状態のときに、磁石の吸着力と吸着力によって生ずる摩擦力によって脚は壁面に固定される。永久磁石がわずかでも壁面から離れた状態では、吸着力は残るものの、壁面との摩擦力は完全になくなり、ボールキャスタにより壁面に平行な方向には自由に移動できる。同図に示した構造では、減速機を介した電動機によって永久磁石を壁面に対して上下する。電動機と減速機は、ボールキャスタの付いたフレームに取り付けてある。このような構造にすることで



注：略語説明
 V(弁), E(エゼクタ),
 G(真空計), F(フィルタ)

図3 真空吸着式壁面歩行ロボットの空気系統 弁開閉のシーケンス制御により、移動の全動作を行なう。

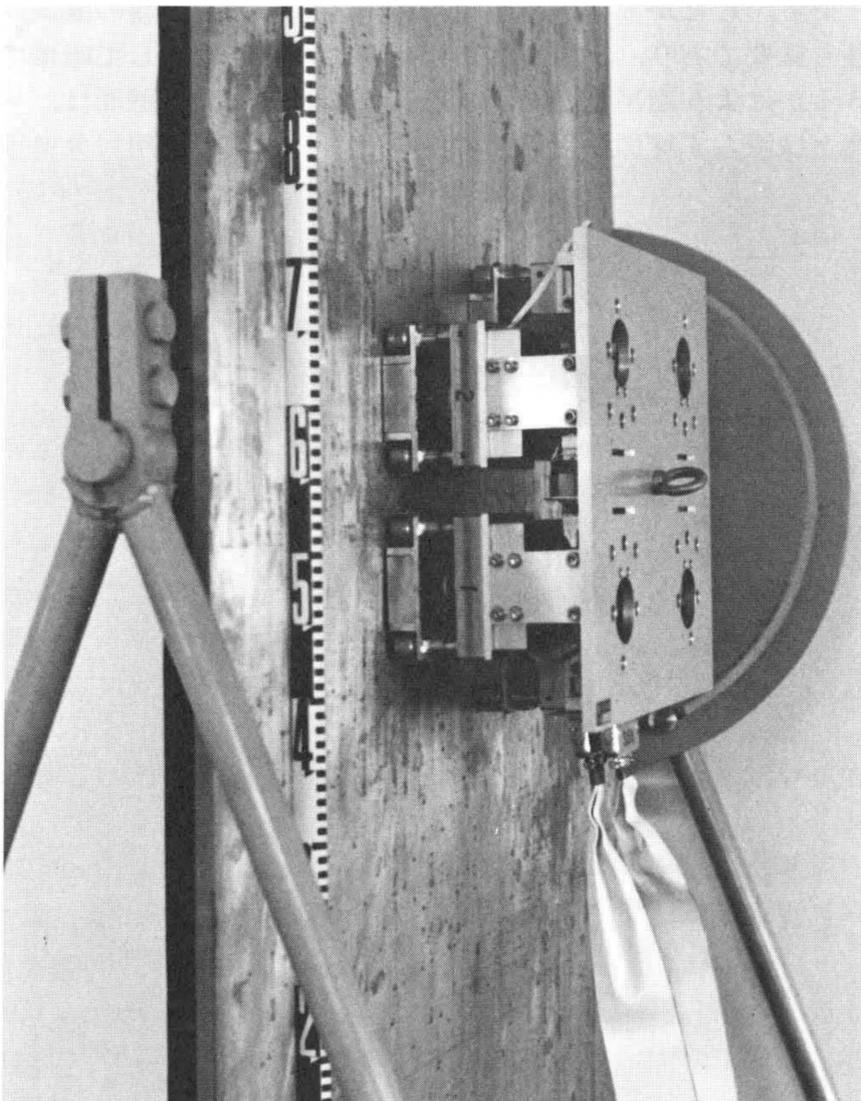


図4 磁気吸着式壁面歩行ロボット 強磁性体壁面に吸着しながら移動する。

1,300Nの吸着力の磁石を壁面から引き離すときの反力は、ボールキャストを介して壁面に戻され、本体フレームは引き離すときの力を一切受けなくて済む。また磁石を引き離すのに必要な力は大きいですが、壁面から1mm程度引き離せば移動動作ができる。したがって、磁石の上下動作に必要なエネルギーはわずかであり、6Wの電動機で着脱動作が可能である。

2.4 壁面歩行ロボットの動作試験

鋼板製の壁面上で試作した2種類のロボットの動作試験を

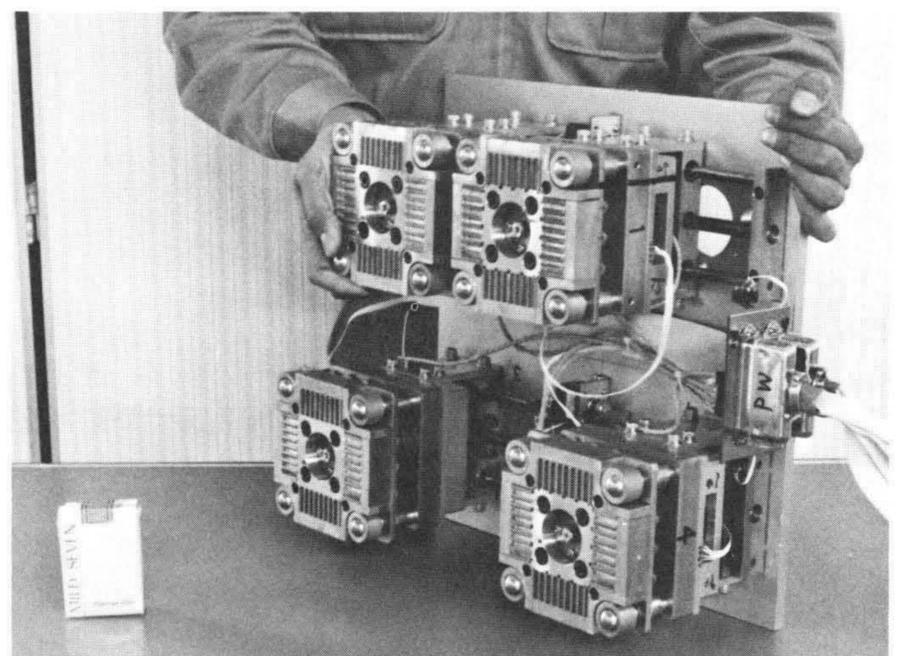


図5 磁気吸着式壁面歩行ロボットの裏面 ボールキャストの付いた4本の磁気吸着脚を交互に動かすことで、壁面での歩行を実現する。

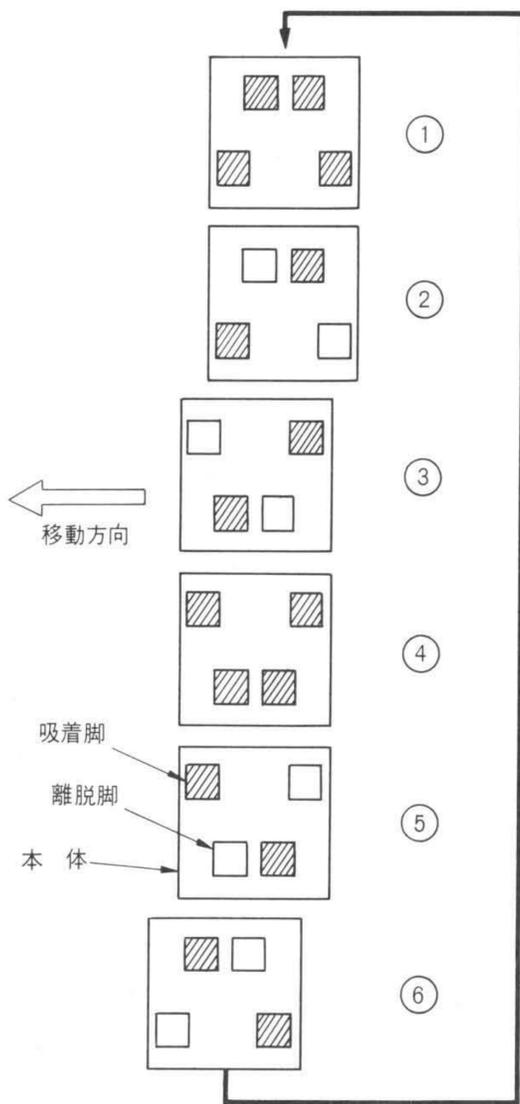


表6 磁気吸着式壁面歩行ロボットの歩容 4脚のうち対角線上の2脚を対として壁面から上下し、本体に対する脚の位置を相対移動することで壁面を移動する。

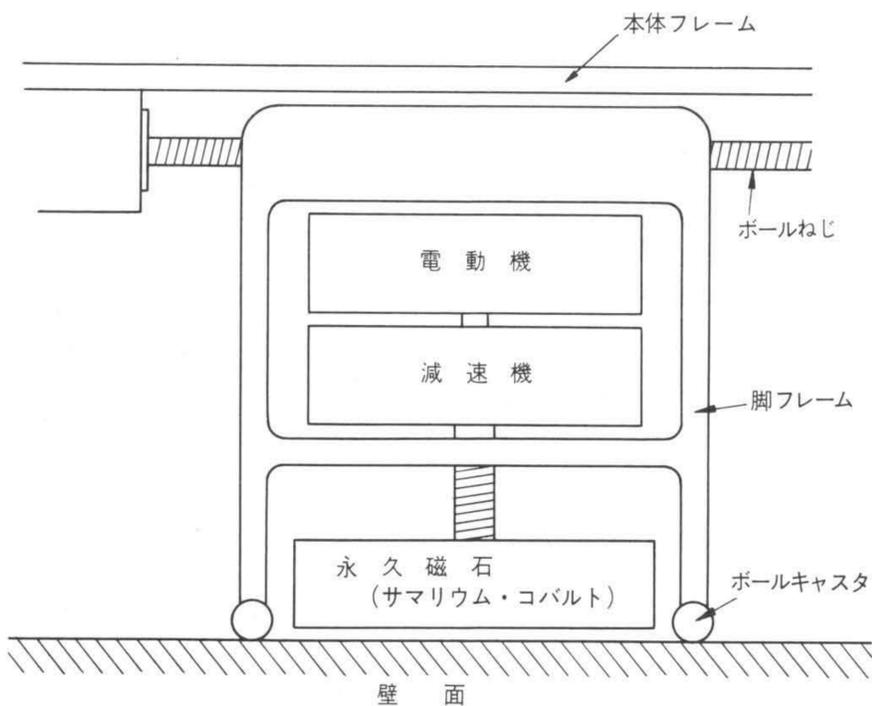


図7 永久磁石吸着脚の構造 磁石の吸引力は、脚フレームとボールキャスタによって支えられ、本体フレームには荷重がかからない。

行なった。使用した鋼板は表面粗さ12.5Sの無規格鋼板である。動作試験結果に基づく壁面歩行ロボットの仕様を表3に示す。動作試験は壁面が垂直の状態から、天井面すなわち水平な壁面の下側にロボットが吸着した状態まで種々の傾斜角度で行ない、各傾斜角での安定な歩行を確認した。同表に示すように、天井面での積載荷重に比較し垂直面の積載荷重は小さい。これは、天井面では吸着力だけで荷重を支えるのに対し、垂直壁では、吸着力によって生ずる摩擦力で支えなければならないことによる。真空吸着方式に比較し磁気吸着方

表3 壁面歩行ロボットの主な仕様 最大積載荷重は、壁面の性状に依存して変化する。この値は、表面粗さ12.5Sの鋼板の場合を示す。

項目	方式	真空吸着式	磁気吸着式
寸法		縦400×横250×高さ120 (mm)	縦370×横370×高さ170 (mm)
重量		11kg	28kg
吸着力		390N	2,500N
最大積載荷重*		95N(垂直壁) 280N(天井面)	300N(垂直壁) 2,200N(天井面)
移動速度		1.0m/min	0.5m/min

注：* 表面粗さ12.5Sの鋼板に対する値

式の移動速度が小さいのは、壁面から永久磁石を引きはがす動作に高減速比の電動機を使用して約3秒を要するためである。移動速度の改善や垂直壁での積載荷重を向上することは、壁面ロボットの今後の課題の一つである。

3 今後の課題と展望

本論文では、真空吸着式及び磁気吸着式の壁面歩行ロボットを試作して原理確認した結果について述べた。壁面移動ロボットは広い応用範囲があるものの、実用化に当たっては適用対象ごとに種々異なった課題がある。磁気吸着式の適用対象は強磁性体の壁面に限られるが、実際には塗装が施してあったり、さびなどの汚れのある壁面であったりする。塗装の厚みを考慮して吸着力を決める必要があり、さびなどの磁性粉の磁石への付着対策も必要である。真空吸着式の適用対象は平滑面とは限らず、コンクリート壁やタイル壁の場合があり得る。したがって、真空吸着方式では、真空吸盤の開発が最も重要であり、どの程度の粗い面に真空を維持して吸着できるかにより適用範囲が決まる。また対象となる壁面は、平面とは限らず球面や円筒面の場合があり得る。適用対象壁面の形状に応じて、脚の配置やサスペンション構造を決めなければならない。壁面ロボットの実用化に当たっての重要な課題に信頼性の問題がある。特に落下防止対策が重要である。現状の技術では、まだ信頼性に対して十分なレベルにあるとは言えない。今後、種々の吸着機構や吸着状態のセンシング技術を開発し、高い信頼性の壁面移動ロボットを開発し実用化を進めなければならない。

4 結 言

真空吸着盤及び永久磁石の2種の吸着方式に関し、それぞれ壁面歩行ロボットを試作した。真空吸着式ロボットは自重11kg、吸着力390N、移動速度1m/min、磁気吸着式は自重42kg、吸着力2,500N、移動速度0.5m/minであり、いずれの方式のロボットも壁面での安定な歩行動作が確認できた。今後は、各種の用途に応じた壁面作業ロボットの開発を進め、かつ信頼性・安全性に関する技術を確立し、実用化を図ってゆく考えである。

参考文献

- 1) 広瀬：移動ロボットで原発を供用期間中検査，日経メカニカル p.52~58(1981.6.22)
- 2) Newton別冊，ロボットのすべて，p.120~121(昭59-2)