車輪またはクローラを用いた壁面移動ロボット

西

亮*

1. はじめに

世界の大都市では高層ビルが多数建設されている。オフィスビルでは昼間、マンションやホテルでは夜間の災害、とくに火災が非常に危険である。このような場合、直接人命の救助が困難としても、避難誘導や簡単な避難用具の運搬などには危険作業ロボットの活躍が期待される。

一方、古いビルの壁面が落下し、通行人が怪我をする事例が最近増加している。この防止には、まず壁面検査ロボットが緊急に必要である。また将来、高層ビルやその他の高層建造物の外壁面の検査は維持管理上重要な業務となるであろう。この作業には近くから観察できると同時に、小修理にも使用できるロボットが要求される。

これらの目的のために多くの壁面移動ロボットが開発されている。ここではそれらのうち、移動形式として車輪またはクローラを用いるタイプについて紹介する。

2. 車輪またはクローラを用いた壁面ロボットのメカニズム

垂直な壁面を移動できるロボットに重要なことは、まず軽量であるということである。さらに、自重を持ち上げるに足る強力なアクチュエータを備えていることが必要である。壁面移動のメカニズムとして、車輪またはクローラを用いる形式には(A)大きな吸盤が車輪またはクローラで移動する形式、(B)クローラに吸盤を取り付けた形式、及び(C)新しい壁面移動ロボットのメカニズムとして、プロペラによる推進力を利用して車輪で移動する形式が考えられている。これ以外に吸盤を取り付けた足による歩行形式も研究されているが、ここでは歩行形式以外の車輪とクローラを用いるモデルについて考察する。

(A)の形式は、吸盤の周辺から空気を吸入しながら移動できる、いわゆるホバークラフトの逆の原理によるもの²⁾、比較的小さな吸盤で、周辺が壁面に密着したも

の²⁾が製作されている。前者は低圧で大流量の送風機を用い、後者は逆に高圧で小流量の送風機が適している。また前者は壁面の小さな凹凸に対して敏感ではないが、後者は吸盤の周辺のスカート部から大量に空気を吸入しないための工夫が必要である。吸盤をいくつかの部分にわけ、それぞれ独立に送風機に連結することで、より大きな安全性が確保できる。移動にはいずれも車輪またはクローラを用いることが出来る。この形式は製作が容易でしかも安全性が大きい、基本的に平面壁に適用できるものである。制御面では吸盤の内圧と送風機特性の関連、衝撃的な荷重が加わったときの安全条件、壁面の凹凸に対応するためのメカニズムなど多くの研究課題がある。この形式の例として、大きな吸盤とクローラを組み合わせた形式のモデルを図1に示している。またこの図面を図2に示している。

(B)の形式には、多数のモデルが研究されている^{3)~5)}。いずれもクローラに多数の吸盤を取り付け、クローラ回転に合わせて数個から10数個の吸盤が同時に壁面に吸着できる構造である。壁面の小さな凹凸に対しても対応できるために、種々の工夫がなされている。例えば、個々の吸盤の傾きが壁面に沿うように変化し、しかも出入りできる機構を備えたものもある。クローラを利用し

図1 大きな吸盤のモデル

原稿受付 1992年7月4日

Wheel or Crawler Type Wall-Climbing Robot

* 宮崎大学 工学部

図2 モデルの図面

- ① エンジン ② プーリー ③ クローラ用モーターカバー
④ 周辺のスカート ⑤ クローラ駆動用モーター ⑥ クローラ
⑦ 送風機 ⑦ 燃料タンク

た階段の移動なども実現しているので、吸盤付きのクローラをさらに発展させると、オーバーハング面の移動も含めて、大きな凹凸を持つ壁面に対しても対応できる可能性が残されている。

(C)はエンジンで駆動されるプロペラや^{6)~10)}、超小型のジェットエンジン、ロケットエンジンなどの大きな推進力を利用してロボット自身を壁面に沿って持ち上げる方式である。空中を移動すると、制御が複雑になるが、壁面に接触しながら移動することで、安全性を確保できると同時に制御が容易となる。軽くて長い車体に多くの車輪を用いて凹凸のある壁面を移動できる。

3. 吸盤に利用される送風機と吸着性能の関係

送風機には上述のように低圧のものから高圧のものまで種々の形式のものが使用できる。またさらに高真空を得るには、ルーツ式ブロア、エジェクタや真空ポンプなどが利用できる。これらの性能は、一般に低圧のものほど空気流量の変化に対して圧力変化が小さく、高真空になるほど流量変化の使用範囲が狭くなる。この関係を模式的に図3に示している。真空ポンプでは吸盤が完全に壁面に密着していないと使用できないのに対して、低圧の送風機ではある程度の空気を流すほうが低い圧力となる形式もある。

送風機の性能は、駆動装置によっても大きく異なる。例えば一定回転数のモーターで駆動される場合には、一定の流量と圧力で効率最大の点があり、この付近での使用が望ましいが、エンジンや直流モーターなどで駆動される場合には、空気流量が減少すると負荷が減少し、駆

動装置の回転数が増加するのでさらに大きな低圧が得られ、吸盤には好都合となる。しかしこの場合、駆動装置の回転数が大きくなるのでこの限界には注意が必要である。

壁面移動ロボットは屋外で使用されることが多いので、電源を必要としないエンジンの使用が有利である。この場合送風機やルーツ式ブロアなどは直接エンジンで駆動できるが、他のアクチュエータの駆動にはモータや油圧装置が必要で、現状では重量や機構の複雑さに問題がある。将来送風機やブロアと連結した空気圧利用の軽量なアクチュエータの開発が望まれる。それによってエンジンのみで移動できれば、電線の重量なども考慮する必要がなく、

手軽に使用出来る利点が生まれる。しかし、この形式の壁面移動ロボットには常に落下の危険があるので、少なくとも命綱が必要となり、そのため救難用に使用するには困難を伴う。

4. 推進力を利用する車輪移動型壁面ロボットのメカニズム

上述のようにエンジンによって駆動されるプロペラの推進力（空気反力）を用いると、自身を空中に持ち上げることが出来る。これを壁面に沿って、しかも壁面との

図3 低圧発生装置の性能（模式図）

- ① 真空ポンプ ② ルーツ式ブロア ③ 高圧送風機
④ 低圧送風機

摩擦力を利用して安全に移動する壁面移動ロボットを作ることが出来る。推進力を壁面側に少し傾け軽い車輪を用いて移動すると、手軽に使用出来るロボットが作れる。この形式では、一般に推進力はあまり大きくないので、大きな荷重は期待できないと同時に車体は出来る限り軽量に作らなければならない。

プロペラにはヘリコプターのような大きな直径のものと軽飛行機のような小さいものが考えられる。大きな直径のプロペラは、小さな動力で重い車体を持ち上げることが出来るが、小さいものは大きな動力を必要とする。一方高層ビルを対象とすると、一般にビルの壁面には地上に比べて強風が予想される。この風による抵抗は大きなプロペラほど大きくなる。壁面の検査や小修理などの目的に対しては、無風時が弱風時に使用すればよいので、大きな荷重に耐える直径の大きなプロペラが有利である。しかし、救難活動に使用する場合には、強風が予想されても安全に使用できなければならないので、小さな直径のプロペラを使用しなければならない。この場合、エンジン出力が大きく従って重量も大きくなり、その分ペイロードが少なくなる。このようにどの程度の直径のプロペラを使用するかは使用目的によってきまる。

高層ビルの壁面には大きな凹凸がある場合が多い。この様な場合に対しても使用できるために、軽くて長い車体に多くの車輪を取り付けた形式が考えられている⁶⁾。これによって壁面の凸部の先端に車輪が接触しながら移動することができる。またこの形式では壁面を軽く押すだけで、大きな力を及ぼさないで、吸盤形式に比して

壁面に与える影響は少ない。さらにこの形式は完全に自立型とできるので、手軽に使用出来ると同時に、自重を支持できるだけの推進力を持っているので、制御面での困難さはあるが、壁面から剥がれた場合でも再び元の位置に復帰させることや、少なくとも安全に軟着陸させることが可能である。この形式の実用的なモデルの概念図を図4に示し、試作モデルが広い壁面上を移動している模様を図5に示している。

5. 推進型壁面ロボットの制御

まず、無風または弱風時の制御としては、まず上下移動のための推進力の制御、斜め移動のための車輪の傾きとこのための推進力の大きさと傾斜角制御が必要である。車輪は駆動する場合としない場合が考えられ、駆動することによって壁面を押す力を上向きに変換できる点と、下降時や停止時にブレーキとして使用できる利点があるが、駆動装置のために自重が増すので、摩擦係数によっては必ずしも有利とはならない場合がある。無風または弱風時の制御変数には、推進力の大きさ T 、その壁面側への傾斜角 θ 、風上側への傾斜角 ϕ と車輪の傾き角 ψ があり、これらを適当に組み合わせることによって安全に移動できる。図5のモデルに対するこの関係の一例を図6に示している。この場合横風の風速を $U=10\text{ m/s}$ と与え、風上側に $\phi=0^\circ\sim 180^\circ$ まで、すなわち風上側への上昇から下降までの移動を考えた場合の風荷重 D/W 、必要な推進力の大きさ T/W 、その風上側への傾斜角 ϕ 及び壁面側への傾斜角 θ を与えている。パラメーターは

図4 推進型モデルの概念図

図5 壁面を移動中の推進型モデル

摩擦係数 μ で、曲線は車輪を駆動しない場合、水平の直線は駆動する場合の結果である。 $\phi=0^\circ$ は横風中を真上に昇る場合で、この時には、風荷重は $D/W=0.2$ すなわち自重の約20%となり、これに対して推進力は $T/W=1.04$ 程度、すなわち無風時の4%増して、風上側に約 $\phi=10^\circ$ 傾け、壁面側には $\theta=4^\circ$ 程度傾ける必要があることを示している。

次に強風時の制御について考える。ロボットは壁面上を車輪で走行するので、横風の風荷重によって車体が横滑りを起こし、落下の危険がある。これを防止するには風上方向へ推進力を傾け風荷重を減少し、さらに壁面との摩擦力を増加するために壁面方向の力成分を大きくする必要がある。そのために推進力を増加し同時に風上方向と壁面方向に傾ける制御を行う。しかし高層ビル壁面の強風は、風速変動が大きい上に、予測することが出来ないで、この制御だけでは十分でない。風速の変動量が急激な場合には、制御機構の遅れによって追従できないことも起こる。この時には滑りが始まり、一旦滑り始めると動摩擦に変わり、再び停止させるのが困難となる。それゆえ風速変動による風荷重に対して時間遅れを伴わない制御力が必要となる。ロボットの車体を翼形に製作すると、横風によって壁面向きに揚力を発生させることが出来る。この力は時間遅れを含まないので、制御力としては有利である。これらの制御力を総合し、さらに風

荷重の小さな変動成分も車輪の横滑りの原因となるので、車体と車輪の間に緩衝装置を取り付けることを想定して、シミュレーションを行った結果の一例が図7に示されている。この例では与えられた風速は約 $U=5\sim40$ m/sの間で変動し、これに対して推進力は最大 $(T/W_{\max})=1.2$ すなわち20%増しまでの余裕がある場合で、滑りが始まるまでの余裕力 F_s/W は $\theta=30^\circ$ 、 $\phi_{\max}=15.8^\circ$ と設定すると、上述の3種類の制御機構を総合することで、 $(F/W)_{\min}=0.1$ 程度が得られることが分かる。すなわち自重の10%程度の余裕力があることを示している。ここに $\phi_{\max}$ は、 $(T/W)_{\max}=1.2$ と与えているので、この条件での取り得る ϕ の最大値を意味している。この結果から、乱れた強風に対して、車体の滑りを防止できる可能性のあることが示されている。

6. 壁面移動ロボットのセンサー及びナビゲーションコントロール

壁面移動ロボットは現状では完全に自律移動を期待するよりは人間との協調制御による移動が適当であろう。そのため壁面上での安全は内界センサーによって自身で制御し、外界に対する制御には人間が介入する方式が考えられる。

壁面上での安全性の制御には、吸盤形式に対して基本的に吸着力が問題となる。吸着力が不足すると、剥がれ

図6 弱風中の制御変数の値

図7 乱れた強風中での安全性

や滑りが起こる。剥がれは致命的であるので起こらない制御が必要であるが、滑りは始まってもすぐに吸着力を増加することで防止することが可能である。このためには、送風機の急加速が必要である。クローラ形式では、各吸盤が独立に送風機に連結されていることが基本となるが、移動中にどの吸盤がどの程度有効に働いているかを知ることも重要な要素である。これらを総合して安全性を認識しなければならない。姿勢制御面では、車体の傾斜角やオーバーハング面での条件などを考慮する必要がある。

推進型モデルでは、車体を傾けると制御が困難となるので、全車輪を同じ方向に傾斜させる制御が望ましい。さらに、上述のように安全を確保するには、風速と風向の計測を行い、必要な推進力の大きさと角度を制御する必要がある。この形式は本来空中を飛行することを目的としていないが、上述のように、落下時など緊急時には短時間の飛行が可能ないように製作されることが望ましい。これによって壁面上で移動困難な場所を乗り越えることや、軟着陸が可能となり、使用範囲を著しく拡大できる可能性がある。

外界センサーを多用する代わりに、外界の条件は人間が判断し指令を与える方式が有利である。双方向の通信には命綱を併用する有線方式と、完全に自立型に製作できる推進型では、無線方式によるものとなる。

7. む す び

壁面移動ロボットは、安全移動のための多くの機構が必要で、しかもこれらを軽量に製作しなければならないので制約条件が多くなる。吸盤形式やクローラ形式が考えられている他に、空気力学的な制御を含む推進形も研究されている。これらはそれぞれ異なる用途に使用出来るので、今後の発展が期待される。

さらに、ビル火災のような場合、一つの形式で十分役立つとは考えられない。種々の形式のものが数多く働い

て救難や救助に役立てばよいので、この観点からもさらに多くの形式のものが開発され、それぞれの特徴を生かして一日も早く実用化されることを期待する。

文 献

- 1) 西ほか、垂直壁面移動機構の設計、日本ロボット学会誌、2-3, p.93 (1984).
- 2) 佐藤ほか、壁面移動検査ロボットの開発と原子力発電所での応用、配管技術、29-7, p.92 (1987).
- 3) 中嶋ほか、コンクリート構造物の壁面点検ロボットの開発、第2回建設ロボットシンポジウム論文集、p.157 (1991).
- 4) 福田ほか、壁面走行ロボットの研究、日本ロボット学会第9回学術講演会予稿集、p.619 (1991).
- 5) 長塚、真空壁面吸着自走車「バックス」、ロボット、53, p.127 (1986).
- 6) 西・宮城、推進力による壁面移動ロボットの研究(第1報 弱風時に使用されるロボットの機構と制御)日本機械学会論文集C編、57-543, p.179 (1991).
- 7) 西・宮城、推進力による壁面移動ロボットの研究(第2報 強風時に使用可能なロボットの機構と制御)日本機械学会論文集C編、58-547, p.163 (1992).
- 8) A. Nishi, A Wall-Climbing Robot Using Propulsive Force of Propeller, Proc. 5th Int. Conf. of Adv. Robotics, p.320 (1991).
- 9) A. Nishi, A Wall-Climbing Robot for Inspection Use, Proc. 8th Int. Sym. on Automation and Robotics in Construction, p.267 (1991).
- 10) A. Nishi and H. Miyagi, Control of Wall-Climbing Robot Using Propulsive force of Propeller, Proc. IEEE/RSJ Int. Workshop on Intelligent Robots and Systems IROS '91, p.1561 (1991).

西 亮 (Akira NISHI)

1957年3月大阪府立大学工学部機械工学科卒業、同年4月松下電器産業(株)入社、1960年大阪府立大学工学部航空工学科勤務、1975年から宮崎大学工学部物質工学科(旧応用物理学科)教授、工学博士、壁面移動ロボットの研究に従事、日本機械学会、日本ガスタービン学会、AIAAなどの会員。

(日本ロボット学会正会員)