無人小型視察ロボットの開発*

妻木 俊道^{*1}, 内田 康之^{*2}, 福島 E. 文彦^{*3}, 三浦 有信^{*4}, 玉田 守^{*5}

Development of the Unmanned Small Scout Robot

Toshimichi TSUMAKI^{*1}, Yasuyuki UCHIDA, Edwardo F. FUKUSHIMA,
Yushin MIURA and Mamoru TAMADA^{*1}Mitsubishi Heavy Industries, Ltd. Sagamihara
3000 Tana, Chuuo-ku, Sagamihara city, Kanagawa, 252-5293 Japan

We introduce the wireless remote controlled unmanned small scout robot. The robot is aimed to scout and work in dangerous area for example the area of the crime or the terrorism and in the poisonous gas atmosphere. It can move around mainly artificial place like in the building with many stairs and can be operated by wireless system from out-of-sight area. And it can be carried to anywhere by one man's shouldering. The robot can start from the base floor to other floor by stairs inclination up to 40 degrees, and scouts with multi camera system and works with a manipulator around the troubled area. After the mission, it returns to the start point on the base floor. All operation and monitoring can be held at the start point. We report that we tested and evaluated the operation and some semiautomatic assist systems for driving about the robot.

Key Words : Robot, Scout Robot, EOD, Unmanned, Remote Control, Multi Crawler, Dangerous, Stairs

1. は じ め に

危険な状況(事件, テロなど), 危険な雰囲気(ガス, 放射線など)にある現場に, 人が入って対応をすると, 二次災害を招き, 返って事を大きくする場合がある. それら危険現場には, 無人ロボットを投入して, 視察, そして作業を行うことで, 人にはできない積極的な活動が可能となる⁽¹⁾. 近年, それら目的のロボットが開発されているが, 海外では特に原子力, 軍事用途の実績⁽²⁾が多い. 安全と言われたわが国でもそのような器材の必要性は高まっている. そうしたロボットの運用性を検証するため, 試作, 試験, 評価を行ったので報告する.

2. コ ン セ プ ト

1 章で述べたような状況で, ロボットに求められる要目をまとめると以下のようになる.

- (1) 市街, 階段のある建物内を自由に移動できる.
- (2) 小型・軽量で現場付近に容易かつ速やかに搬入できる.
- (3) ロボット自体を見えない場所から遠隔操縦できる.
- (4) 遠隔操縦は操作性がよく, 半自動化等のアシストがある.
- (5) サンプル収集等の作業が可能なマニピュレータを備える.
- (6) 遠隔操縦以外の, 動力部, 走行制御部は自立式である.

* 原稿受付 2012 年 5 月 6 日

^{*1} 正員, 三菱重工業(株) (〒252-5293 神奈川県相模原市中央区田名 3000)^{*2} 正員, 日本大学 生産工学部^{*3} 正員, 東京工業大学大学院 機械宇宙システム専攻^{*4} (株) ヤマテコーポレーション^{*5} (有) イーストドライブ

E-mail: toshimichi_tsumaki@mhi.co.jp

3. 仕様

2章の要目から、さらに具体的な仕様をまとめた。

(1) 一般の建物では、建築基準法などから、その階段の最大傾斜角は約 35deg となっている。従って、 35deg 以上の傾斜を登降坂できる必要がある。そのために、左右にクローラを有する装軌式とし、クローラは階段のエッジに引掛かるラグを付けたものとした。また、登降坂角を高めるため重心を下げる必要があり、車高を低くした。クローラ高さが低くなるので、登坂時は階段のエッジにクローラが引掛かるようにするため、図1のように車体前端に起倒可動式のサブクローラ（フリッパ）を設け、乗り上げができるようにした。

また、図2のように、階段から踊り場へ乗り上がる際、車体重心が踊り場手前エッジを越えると、車体は一気に前に倒れ込む。その際、ロボットには衝撃が加わり、安定上、良くない。また、踊り場から階段に降りる際も同様である。それら挙動を改善するため、上記の起倒可動式のサブクローラ（フリッパ）式構造、あるいはマルチクローラ式構造が有効であると考えた。

Fig.1 The sequence of ascending the stairs

Fig.2 The sequence of getting on the landing softly

米国 iRobot 社の 'Packbot'⁽³⁾は、単純な構造の前方のみの左右独立サブクローラ（フリッパ）を備え、屋外自然地形での走破性を有し、主に軍用で普及した。'ROBHAZ-DT3'⁽⁴⁾は車体を階段に適応しやすい形状のフロントトラックと、フラット形状のリアトラックとに分割し、それらをつなぐ非駆動の屈曲軸をクローラの推進力のみで受動制御し、単純な構造でマルチクローラのような高い階段踏破性を得た。

マルチクローラは米国の 'ANDROS'⁽⁵⁾などで古くからその効果が知られ、'UMRS-2009'⁽⁶⁾、'Aladdin'⁽⁷⁾、'Kenaf'⁽⁸⁾では、瓦礫等のランダムな不整地を踏破するため、本体クローラの前後に左右一対の起倒可動式サブクローラ（フリッパ）を備えており（6クローラ）、左右のアプローチ角を独自に違う角度にもできる。また、'KOHGA 2'⁽⁹⁾では起倒可動式の独立4クローラ構造で同様な能力を有している。一方、本ロボットでは2章(1)項の通り、専ら階段等の人工直交系平面構造物が対象なので、本体中心線上のただ一つの起倒可動式サブクローラ（フリッパ）でシンプルに対応した。

Fig.3 Relation between the velocity of main crawler and sub crawler when sub crawler is synchronous driven.

The ratio between velocity of V_{cm} and V_{cs} are fixed and synchronous (In most case, $V_{cm}=V_{cs}$). However, the ratio between V_{cmh} and V_{csh} those varies according to the angle between V_{cm} and V_{cs} . So the ratio between V_{cm} and V_{cs} should be passively changeable, otherwise either crawler slips.

その一つのフリッパの接地のみを制御，確認するため，操縦が容易となった。

また，本体中心線上にあることでフリッパとマニピュレータとの兼用ができ，システム構造の一層の単純化を図ることができた。尚，文献(3)～(8)の事例ではサブクローラ（本体にある左右クローラの前あるいは後の起倒式のもの）の回転はメインクローラと同期した駆動式である（文献(4)の事例でも左右独立に前後のクローラ間の回転は同期している）。しかし，メインクローラとサブクローラの階段への接触角度等が異なると，車体の推進に合わせて両者の動きが相互干渉して内力で滑りを生じることがある（図3）。

一方，本ロボットではサブクローラの回転を非駆動とし，接触した対象に従動する（パッシブ）方式を取っており，そのような不具合は生じない。'Helios-VII'⁽¹⁰⁾では左右2クローラと，本ロボットと似た中心線上のマニピュレータを備えるが，ランダム不整地踏破のために左右クローラが独立にスイングできるようになっており，マニピュレータを使って先端のホイールを接地させてクローラと協調動作させ，急傾斜の登坂を可能としている。ホイールは従動式（パッシブ）で，本ロボットと同様，図3の問題を解決している。

- (2) オペレータは，ロボット自体を直接見られないので，遠隔操縦で長い階段を登降坂させる際，階段の進行方向に沿って直進させるのは難しく，ロボットが斜めに進むと，階段のエッジへのクローララグの食付きが不完全になる，あるいは，ロボットが階段の端に接触するなど，不都合である。階段に沿って登降坂させようとする場合，ロボットの進行方向が傾いた際は，傾斜センサの出力から，高く上がった側のクローラを減速して傾きを自動的に修正する直進登降坂支援機能を盛り込んだ（図4）。その制御アルゴリズムを以下，および図5に示す。

図4のような階段の登降坂角（最大傾斜線方向角）を D （登坂時 $D>0$ ），階段の直進方向に向かつての傾き方向角を S （登降坂時とも進行方向に向かつて右に傾いた際， $S>0$ ）とすると，傾斜センサの出力 F は，

$$F = \sin S \times D \quad (1)$$

に比例する。その出力を用い，傾き方向角 S の絶対値を減らすように，高く上がった側のクローラの手速度指令値を減ずる。尚，安全性を高めるため，沈んだ側のクローラの手速度指令値の増加は行っていない。左右のクローラ手速度指令値（オペレータからの指令値）をそれぞれ v_r , v_l ，直進登降坂支援機能による左右クローラの修正手速度指令値をそれぞれ VR , VL ，修正係数を kd とすると，

$$VR = \begin{cases} v_r & (S \geq 0) \\ v_r - kd \times F = v_r - kd \times \sin S \times D & (S < 0) \end{cases} \quad (2)$$

$$VL = \begin{cases} v_l - kd \times F = v_l - kd \times \sin S \times D & (S \geq 0) \\ v_l & (S < 0) \end{cases} \quad (3)$$

となる。尚，さらに，修正値を速度に応じて加減することも考えたが，実施していない。

Fig.4 Straight ascending and descending assist system

Fig.5 Algorithm of the straight ascending and descending assist system

後述する 7・2・1 項の階段において、直進登降坂支援機能は有効に機能し、左クローラを全速、右クローラをほぼ半速度指令値（オペレータからの指令値）で登坂させた場合、本機能なしでは 7・2・1 項の階段で中央真っ直ぐに置いたロボットが、斜面方向距離に 1m 弱進んで階段右端に当たったが、本機能により 1 階分の高さ約 3.5m の階段（斜面方向長さは約 6m）を端に接触せずに登り切ることができた。通常はあり得ない操作であるが、煙などで前方視界が不十分な場合などに有効な機能であることを確認した。

尚、文献(6)の事例では、似た機能として、車体ヨー角の光ファイバジャイロにより、直進した際のヨー角を基準として、進行方向がずれた場合、本ロボットと同様に（図 4）、ずれて進行が進んだ側のクローラ速度を抑制して車体方向を修正し、登降坂の操作性を向上させている。

- (3) 操縦のためのカメラは図 6 のように車体前端に備えると、障害物は大きく近接的に見えるが、ロボット自体との位置関係が把握しにくい。一方、図 7 のように、車体後方高所に備え、障害物とともに車体前端を含めて俯瞰すると、車体前端に対する障害物の位置関係が明確になり、一般的に操縦性が向上する。実際は、図 6 と図 7 の両方を合わせた 2 台のカメラ画像を利用した。また、音響のモニタ機能も現場の臨場感を得るには有用であり、備えた。

Fig.6 The position of the front camera for driving

Fig.7 The position of the rear camera for driving

- (4) 1 人で運ぶことができる。具体的には手で運ぶことができるか、背負って運ぶことができる。本体総質量約 25kg 以下とし（一般に人に持たせたいとされる最大質量の目安は 25kg とされている）、寄り付きが難しい現場付近に迅速に搬入、展開できる。

(5) (1)で記した、サブクローラ（フリッパ）をアームの一部として兼ねた小型マニピュレータを備え、先端のハンドで軽作業（危険物除去、サンプリング等）ができる⁽¹¹⁾。また、マニピュレータ先端部にもカメラを備えた。マニピュレータを可動式雲台として扱うことで、カメラを対象物に覗き込ませることができる。

尚、図9の本体側面図に示すように、本マニピュレータの前後（起伏）等姿勢変化により、重心位置の前後ができる。サブクローラ（フリッパ）が接地（一直線）の状態では、マニピュレータのみによる水平重心移動距離は約±25mmである。階段、段差の登りでは、自重を支持するエッジ位置に対して、重心位置を前方（上方）に、降りでは、後方（上方）に移動することで、傾斜面上で、重心安定性を増加できる（図8のb.）。

(6) 無線遠隔操縦式とする。電波法下で実用的な距離で信号伝送、画像伝送とも行うため、市販のSS（スペクトラム拡散式）無線機を使用する。操縦信号、車体モニタ信号、そしてカメラ動画像を多重化して授受する。

(7) 動力源には充電式電池を使用し、通常の建物の1階から3階程度以上の距離（十分に危険場所から離れたとみなせる）を電線なしで往復移動でき、その間の移動、到着目的地での適切な時間（最大1時間程度）のマニピュレータ操作、視察画像伝送などができる。

(8) 探査作業として、危険物が仕掛けられた自動車等の床下に入り(5)項のマニピュレータ先端のカメラで走査ができる。そのために車体高を低くした。結果的に重心を低くでき、(1)で述べたように急傾斜登降坂が安定して行える。

4. 駆動系の設計

4・1 走行系各部寸法の設定、検証と問題

4・1・1 登降坂を行う階段の想定

ロボットを登降坂させる階段、踊り場について、建築基準法における階段の段の最大規定寸法は、踏面（一段の奥行き）で小学校等の260mm以上、蹴上げ（一段の高さ）で家庭用の230mm以下である。本ロボットの運用を想定する一般的な公的な場では踏面300mm、蹴上げ200mm等が多い。

後述の7・2・1項の試験（図13）ではそれぞれ290mm、200mmであった（傾斜角34.6deg）。また、階段幅は建築基準法から最小750mmを想定した。

4・1・2 必要な接地長の決定

さらに、踏面300mm、蹴上げ220mmの厳しめの階段（傾斜角36.3deg）を想定した。安定に登り降りするためには、図8のように登坂中は重心の後下方（図8の図上では重心位置の左下方）のクローラ部が必ず1つ以上の階段エッジに載り、荷重支持されていなければならない。そのためには、本ロボットの場合、サブクローラとメインクローラを合わせた直線状でのクローラ総接地長が900mmあれば十分であることを図より求めた。

4・1・3 各主要寸法の決定

階段幅750mmの制約から車体幅は500mmとした。これと踊り場の踏面の関係から車体長は700mmとした。

4・1・2の接地長900mmを満足するために、メインクローラ接地長580mm、サブクローラ接地長320mmとした。サブクローラ（フリッパ）水平時、900mmの一直線の接地長が得られる。尚、サブクローラは3章(1)項に示す通り従動式で非駆動なのでメインクローラにはあるラグは不要であり、備えていない。

4・1・4 ピッチずれによる脱落衝撃発生の問題

メインクローラが2ヶ所以上の階段エッジに接している図8のいずれの場合においても、メインクローラの荷重支持は、任意のピッチの階段では、その斜面方向エッジ間距離と、ラグのピッチ（30mm）の整数倍長が一致しない限り、一カ所で行われている。そのためラグには十分な強度を与えている。そして、図8のc.で、エッジBの部位かその上に位置するエッジのうち、エッジBが荷重支持を行っていた場合、上記の不一致があることで、d.へ移行時に荷重支持ラグの切り替わりが起これば、ラグ1ピッチ長以内の脱落が生じ、衝撃が発生する。しかし実験では後述の7・2・1項の試験時には問題とはならなかった。最悪のケースとして、約35degの登坂角度でラグのピッチ1つ分脱落を生じさせて衝撃が発生させても、実験ではラグが破損する、あるいは、ロボットが滑

り落ちるなどのことはなかった。

但し、このような不連続な荷重支持でも滑らかに脱落なく駆動系への衝撃を抑えて登降坂できるようにすることは重要な課題である。文献(6)の事例では、そのような脱落などの際の駆動系への衝撃で駆動機構を損傷させない動力伝達装置を採用している。また、文献(9)の事例では上記脱落への対応として、クローラの材質を軟質なゴムにした上でラグピッチを密にすることにより、脱落の発生、衝撃を抑えている。

This is a sample of ascending the stairs of severe condition. It's necessary that the crawler is always supported at one place or more by the edge of the stairs in the left of center of gravity, in this sample. Therefore, it is possible to ascend the slope with stability. It is also possible to descend similarly with stability because center of gravity is at about the center of the maximum ground contact length 900mm.

Fig.8 Sequence of the ascending steep stairs

4・2 走行系

4・2・1 設計目標

走行系は通常の滑らかな床面、そして4・1・1項で述べたような40deg弱の階段・斜面を登降坂でき、さらに一般に最大の駆動力が必要とされる摩擦係数の高いコンクリート、アスファルト舗装路面上での超信地旋回ができるように設計した。実際には、40deg以上を登坂して斜面方向に最高速度0.3m/sで走行できることとした。

最大総質量30kgで推進力 F_s は、直進時左右クローラ各々で、

$$F_s \geq (30[\text{kg}] \times 9.8[\text{m/s}^2] \times \sin(40[\text{deg}])) / 2 = 94.5[\text{N}] \quad (4)$$

左右各 crawler の必要駆動出力 W_s は、

$$W_s \geq (94.5[\text{N}] \times 0.30[\text{m/s}]) = 28.4[\text{W}] \quad (5)$$

4・2・2 走行系モータの選定

4・2・1項で求めた駆動力 Ws と、超信地旋回駆動をともに満足するパワーから、各クローラの必要出力は機械系効率（最悪 30%程度）も考慮して、約 100W 以上が必要と試算した。階段・斜面登降坂時の停止時に自質量を停止保持できるための負作動ブレーキを備えた maxon motor⁽¹²⁾の定格出力 250W 品を、左右クローラに 1 個ずつ装備した。減速器は遊星型とし、減速比は 100 を採用した。モータ形状、専用ブレーキユニットや専用小型減速器等のオプションの有無により選定が制約されたため、モータ出力は大きめとなったが、結果的に最高速度、最高駆動力とも十分となった。

水平最高直進速度は 0.5m/s を目標としたが、無制御ではその倍の 1m/s 程度となった。階段登降坂では、操作ミスでの急峻な動きによる脱落を防ぐため、登降坂角約 10deg 以上では最高速度約 0.4m/s、約 35deg では最高速度約 0.2m/s に制限した。但し実験では 4・1・4 項に記した荷重支持しているラグの切り替りによる小脱落に対する安全策として、登坂で約 0.25m/s、降坂では約 0.15m/s 以上で進ませなかった。尚、それら値は限界値ではなく、試験による経験的なものである。

4・3 サブクローラ（フリッパ）、マニピュレータ系駆動モータの選定

サブクローラは 3 章(1)項の通り、従動式なので駆動モータはない。そして、マニピュレータのアームフレームを兼ねるサブクローラ（フリッパ）の起倒には負作動ブレーキ付きの maxon motor の 120W 品を装備した。また、その先のひじユニットの起倒には同社製負作動ブレーキ付きの 50W 品を装備した。その他ハンドユニット用には手首の起倒用とその回転用に 2 個の 5W モータを差動で用い、グリッパの開閉・把持用には 20W 品を装備した。

尚、4・2・2 項の走行系同様、オプションに拘束され、出力過大なモータが選定されたが、支障はなかった。

5. 機 構 の 設 計

以上をまとめた本ロボットの基本諸元を表 1 に示す。図 9 に構造 2 面図を示す。サブクローラ（フリッパ）を兼ねたマニピュレータアーム部先端にひじフレームが取り付けられ、さらにその先にピッチ／ロールできる手首を備えたグリッパが装備されている。グリッパは約 1kg の物体を扱うことができる。ボディはアルミモノコックで、尾部の着脱式ペイロードボックスには、試験時は車体内と同容量の増加電池を搭載した。

Table 1 Principal spec of the robot

Total weight		28.8kg	Max. climbable slope		more than 35 deg
Outline measurement		see Fig.9	Min radius of turning outer		0.86m (by pivot turn)
Max. speed	on flat floor	0.5 m/s (1.8km/h)	Max. payload of gripper		about 1.0kg
	on 35 degree	0.2 m/s	Power supply		24V/10Ah Ni-MH

6. 制 御 系

システム構成を図 10 に示す。本システムは見通しのきかない遠方（電波経路長で 100m 程度）にロボット本体を移動させ、その目的地や移動途中でカメラにより視察・監視を行い、目的地ではマニピュレータで小危険物、毒物等の除去作業を行うことができる。そのため、ロボットは、固定地上局から無線伝送により、画像・音響を確認しながら、無線遠隔操縦される。ロボット本体の状態（走行速度、姿勢、電池残量等）、マニピュレータの形状等をリアルタイムに操作コンピュータの状態モニタディスプレイ上で確認できる。周囲環境（温度、ガス等）のセンサ類を尾部の着脱式ペイロードボックスに備えることもできる。

無線は、画像、制御伝送とも屋内利用を主とすること、また一般使用可能な市販品を使い易いことから、ギガヘルツ帯のものを使用した。ロボット上のカメラはモノラル音響も同時伝送でき、モーション jpeg 形式で圧縮した動画像を無線伝送し、基地局側チューナで展開し、モニタディスプレイに送る。フレームレートは約 15fps、そしてこのような場合、フレームレートより操縦感覚に影響が大きい伝送遅れは約 0.5[s]であり、低速の本ロボットでは問題とならなかった。

Fig.9 Drawing of internal structure of the robot

ロボット側では'TITech Wire'⁽¹³⁾を使用し、本体 CPU にも同シリーズの CPU ボードを使用した。

ロボット内部の I/O には'TITech Wire'LAN 接続用の D/A 出力ボード、A/D 入力ボード、DIO 入出力ボード、そしてエンコーダカウンタボードが装着されている。左右クローラ走行モータにはエンコーダが装着されており、操縦側の速度指令をデジタル的に速度制御（コンティニュースペース制御⁽¹⁴⁾）しており、停止時のドリフト微動等が無い。サブクローラ（フリッパ）の起倒にも同様のモータが装着されているが、その起倒角度を知るためにエンコーダでなくポテンショメータが装備され、A/D を介して入力している。

走行、フリッパのモータ電流負荷はモータドライバを介してアナログモニタされており、サブクローラ（フリッパ）を倒して床や階段のエッジに接触して荷重が大きくなると、そのことは接触情報として操作コンピュータの状態モニタディスプレイで操縦者に知らされる。

階段登降坂における、フリッパ動作シーケンスについては、それを半自動で行う従動制御モードと、その詳細をオペレータが手動で行う手動モードがある。図 1 で a.の状態に従動制御モードにすると、サブクローラを予めパラメータセットされている角度で持ち上げる（一般の階段ではメインクローラに対し上向きに約 40～45deg にセットしていた）。そのまま直進させ、階段の第 1 段目を登って、車体のピッチ方向の傾きが概ね階段の斜度（一般の階段ではやや少なめの約 25deg に設定していた）を超えると、図 1 の c.のように自動的にサブクローラ（フリッパ）をメインクローラに対して直線となるように固定する。階段を登り切り、オペレータが図 2 の a.の状態のタイミングを押しボタンで指示すると、フリッパは、浮いた状態から図 2 の b.のように、一定小トルク値となるまで押下げられ、踊り場の床に接触する。一定小トルク値は実験では手動で調整したが、5N・m 程度が最適であった。そしてさらに進んで、図 2 の c.の倒れ込みが起これば、フリッパは急速に水平になる方向に押し動かされる。これに対し、フリッパは発生される小トルクに対して外力による角度変化が起これば、その角速度に比例した抗力が発生するように制御されている。それにより、倒れ込みの衝撃が抑えられ、軟着地が行われる。簡単な半自動アシスト機能であるが、効果的であった。

Fig.10 System Configuration

この操縦支援機能は 3 章(2)項に記した階段登降坂での直進登降坂支援機能と共に、本ロボットシステムの主要機能であり、階段登降坂の操縦性が大きく向上した。

そして、本ロボットの操縦モードには、上記の直進登降坂支援機能の ON/OFF、フリップの従動制御モード／手動制御モードの切り替えがある（両者は独立した機能で、階段登降坂時で併用できる）。

具体的な操縦は、市販の PC ゲーム用操作パッドに取り付けられている指先操作ジョイスティック、スイッチ、および、別置きスイッチボックスにより行う。

スイッチボックスでは、上記モードの設定、表示の切り替え等を行う。PC ゲーム用操作パッドの左右ジョイスティックでは左右クローラ／マニピュレータ（カメラ雲台兼用）の操作を、そして PC ゲーム用操作パッドのスイッチでは、左右ジョイスティックで操作する作動軸の割り当てや、速度比の切り替え等を行う。

操縦支援機能として、本ロボットが有する半自動レベルより進んだ半自律レベルにある事例として、文献(7)の事例では、4つのフリッパーの接地情報や非接触距離センサでの対地距離情報により、走破のためのフリッパー形状を、半自律の制御則を定めて操縦支援し、不整地、階段等の走破性を高めている。

7. 運用

7・1 全体構成

7·1·1 外觀

本ロボットが平床上に転がっている手榴弾模型を除去しようとしている写真を図 11 に示す。ハンド上にカメラが 1 台、尾部のアンテナタワー上にもう 1 台のカメラが装着されている。前者は図 6 の車体前端カメラに相当し、後者は図 7 の後方カメラに相当し、操縦を容易にしている。尚、階段降坂時は、マニピュレータを操作して、ハンド上カメラで、ロボット前下方等をのぞき込ませて、必要な視界を得ている。

7・1・2 搬送について

3章(4)項を具体化して、本ロボットを市販の登山用しよい子を用いて移送しているところを図12に示す。

Fig.11 Scene to which robot uses manipulator and a model of grenade is being removed.

Fig.12 Scene that a person is shouldering the robot with the climbing mountain transportation tool.

7・2 運用試験

7・2・1 階段登坂

図13に、4・1・1項に記した一般的な階段(踏面 290mm, 蹴上げ 200mm, 有効幅約 1,150mm, 傾斜角 34.6deg)を登坂している状況を示す。3章(1)項の図1, 図2の際のサブクローラ(フリッパ)の押し当て、停止は6章に記した従動制御機能により行われ、3章(2)項の直進登降坂支援機能と併せて階段登坂を行った。

尚、コンクリート表面の階段では難なく階段登坂ができたが、屋内に多いリノリウム床の場合、最初の段に乗り上がろうとする際(図1のb.の状態での前進)、メインクローラがポリウレタン樹脂の場合、その最下端の接地面と床との間の摩擦係数が小さく(推定摩擦係数: 約 0.2)、滑ってしまい登坂始めができなかった。サブクローラ(フリッパ)が非駆動の従動式のため、駆動力が不足することでの欠点である。しかし、クローラをクロロブレン系ゴム(硬度約 60, 推定摩擦係数: 約 0.5)に換えることで、メインクローラ下端と床との摩擦が増大し、円滑な登降坂ができるようになった。クロロブレン系ゴム製では接地摩擦が大きいため、コンクリート表面の階段では踊り場などで旋回性が悪化することが懸念された。そのため、当初、接地摩擦が小さいポリウレタン製クローラを使用した。4・2・2項の通り、ラインナップの制約で、大出力モータを採用したので問題なかった。

尚、図6, 図7のものともカメラは水平視野角 100deg くらいのものが使いやすかった。

7・2・2 屋内視察

図13のような形態で、1階から3階までの踊り場がある約 35deg の傾斜の階段を2台の搭載カメラで(操縦者はロボット本体を見られない)、3階の「現場」を視察し、状況を動画で伝えた。鉄筋コンクリート建物内の階段であったが、6章に示した 15fps, 遅れ約 0.5s の動画を維持した。24V10Ah の電池パック1つで1往復できた。

往復に要した時間は、1階から3階の平床に入って走行を開始する迄に約 4min 5s (約 245s), 往復で1階の床に降りきる迄に約 9min 10s (約 550s)であった。降坂に、より多い 5min 5s (約 305s)がかかったのは、降りる際の安全確認に、より慎重な操縦になったためと、階段と踊り場間を安定に移行するためのサブクローラ(フリッパ)は、登坂で、より効果が大きかったためである。

尚、3階の登坂を、高さ 8[m]とすると、効率 100%での登坂エネルギー: Et は、

$$Et = 30[\text{kg}] \times 9.8[\text{m/s}^2] \times 8[\text{m}] = 2,352[\text{J}] \quad (6)$$

一方、搭載電池のエネルギーは、70%が使えるものと仮定して、

$$Eb = 24[\text{V}] \times 10[\text{A}] \times 3,600[\text{s}] \times 0.7 = 604,800[\text{J}] \quad (7)$$

実際は、制御系の常時電力消費、操縦のもたつきによる時間的効率：0.3、機構系効率：0.3、電力系効率：0.5を全て考慮すれば、有効なエネルギー： E_p は、

$$E_p = Eb \times 0.3 \times 0.3 \times 0.5 = 27,216[\text{J}] \quad (8)$$

程度と考えられる。

$$E_p > Et \quad (9)$$

であり、3階迄しか試験していないが、10階以上の建物でも、十分往復してくることができる。

但し、採用したSS無線機は2.4GHz帯の微弱電波式であったが、見通しのきかない屋内階段で使用したので、1階から3階までの運用がやっとであり、3階より上に向かおうとすると通信不能に陥った。より低周波(400MHz帯)ではあるが、特定小電力品(見通しで1km以上到達とされる)などを使用することで、屋内でも到達距離が伸びることが期待できるが、小型市販品が少なく、搭載面で難しい等の課題があり未実施である。

7・2・3 屋外視察

図14に海外の警備等でよく行われる自動車床下を走査しようとしているところを示す。

Fig.13 The robot is ascending the stairs of 34.6 degrees.

Fig.14 Scene to which robot makes the best use of thin body and bottom of car is scanned.

3章(8)項の仕様で、階段登坂を容易にするために、車高、重心を非常に低くしたことで併せて実現できた機能である。自動車等の床下に入り、3章(5)項のマニピュレータ先端に装備のカメラを上向きにしておき、クローラを駆動して走査を行う。当初、走査操縦は難しかったが、ジョイスティックによるクローラ指令速度を高速・低速で切り替えられるようにして(低速では速度を約1/15に細かくした)、走査は効率的になった。

8. ま と め

複数のカメラや、サブクローラ(フリッパ)の接触検知情報などがあっても、ロボット本体の様子を直接見ら

れない場所からの階段の登降坂操縦は難しい. 4・1・4 項のようなクローララグのピッチずれによるクローラ脱落, あるいは, 3 章(2)項で触れたように, ロボットが階段に対して誤って斜めに進み, 階段へのクローララグの食付きが不完全になることによるクローラ脱落が, 登降坂にとって危険で, オペレータにとっては不安であった.

前者は 4・1・4 項のように, ロボットの滑り落ちを招くことはなく, 文献(9)の事例のようなクローラの改善により解決できるが, 本ロボットの操縦制御系開発では, 専ら後者の解決が重要であった.

これに対しては 3 章(2)項の直進登降坂支援機能の開発, 装備が非常に効果的であり, 課題を解決できた.

階段は一般に非常に定式化された構造, 寸法であり, 直進登降坂支援機能, そして 6 章で記したフリッパの従動制御 (半自動制御) 機能を組み合わせ, 加えて階段寸法計測機能を備え, 階段登降坂自体をより高度に自動化させることが期待できる.

今後, そのような課題を解決し, 本ロボットのようなシンプルな構造を維持しながら, 使いやすいロボットの実用化に努めて行きたい.

文 献

- (1) 妻木俊道, “危険作業ロボット”, 日本ロボット学会誌, Vol.18, No.7(2000), pp.946-950.
- (2) “xBot prepares to enter the field”, *unmanned VEHICLES*, Vol.13, No.2(2008), pp.12-14.
- (3) Brian Yamauchi, “Wayfarer: An Autonomous Navigation Payload for the PackBot”, *Proceedings of AUVSI Unmanned Vehicles North America*(2005).
- (4) W. Lee, S. Kang, M. Kim, and M. Park, “ROBHAZ-DT3 Teleoperated Mobile Platform with Passively Adaptive Double-Track for Hazardous Environment Applications”, *Proceedings of IEEE/RSJ IROS*, Vol.1(2004), pp.33-38.
- (5) REMOTEC SYSTEMS & TECHNOLOGIES, Remotec Westinghouse, ‘ANDROS’ series catalogue(1995).
- (6) 大坪義一, 川邊慶久, 宇田宏, 小林滋, 小林泰弘, 山本祥弘, 梅田栄, 海藻敬之, 前田弘文, 高森年, 田所諭, “閉鎖空間内探査移動ロボットのための操縦インタフェースの開発”, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会講演論文集(2010), 1A1-C-04.
- (7) Kazunori Ohno, Shouichi Morimura, Satoshi Tadokoro, Eiji Koyanagi and Tomoaki Yoshida, “Semi-autonomous Control of 6-DOF Crawler Robot Having Flippers for Getting Over Unknown-Steps”, *Proceedings of IEEE/RSJ IROS* (2007), pp.2559-2560.
- (8) 小柳栄次, “サブクローラを持つレスキューロボット”, 日本ロボット学会誌, Vol.28, No.2(2010), pp.147-150.
- (9) Hitoshi Miyanaka, Norihiko Wada, Tetsushi Kamegawa, Noritaka Sato, Shingo Tsukui, Hiroaki Igarashi and Fumitoshi Matsuno, “Development of an unit type robot KOHGA2 with stuck avoidance ability”, *IEEE International Conference on Robotics and Automation*(2007), pp.3877-3882.
- (10) M.Guarnieri, P.Debenest, T. Inoh, E. Fukushima, S. Hirose, “Mechanical design and basic tests on Helios VII a vehicle for search and rescue operations”, *Journal of Advanced Robotics. Special Issue on Rescue Robotics*, Vol.19(2005), pp.901-927.
- (11) 内田康之, “地上用携行多機能型ロボットの提案”, 第 21 回日本ロボット学会学術講演会予稿集(2003), 3G26.
- (12) マクソンジャパン(株), maxon motor カタログ(2004).
- (13) 福島 E.文彦, 滝田謙介, 広瀬茂男, 中村亨, “知能ロボット用シリアルバス型制御システムの研究-TITech Wire の開発”, 第 7 回ロボティクス・シンポジウム予稿集(2002), pp.155-160.
- (14) 妻木俊道, 小林洋司, 中野栄二, 内山研史, 玉田守, “急傾斜山林地用実大歩行ロボットの開発”, 日本ロボット学会誌, Vol.27, No.4(2009), pp.102-112.