高段差乗り越え可能なクローラロボット機構* (自動段差登り動作の実現)

神 村 明 哉^{*1}

A Crawler Robot Mechanism Enabling High-Step Climbing (Realization of Automatic Climbing Motion)

Akiya KAMIMURA^{*2}

^{*2} National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST),
1-2-1 Namiki, Tsukuba-shi, Ibaraki, 305-8564 Japan

We introduce a unique shaped crawler robot aimed for high-step climbing that is considered the most necessary ability in urban search and rescue operations. The crawler robot is composed of two triangular-shaped crawler devices connected by a center shaft, a straight crawler device and a two-link mechanism connecting the shaft and the straight crawler. The robot is very compact and light weight compared to other rescue robots. It has eight D.O.F. in total, four of which are for crawlers and the others are for shifting the shape of the robot. We confirmed that the proposed robot can get over 36 cm high-step one-and-a-half times as high as its original height. We also implemented a height-independent climbing motion algorithm based on statics and geometrical analysis while climbing process. Various hardware experiments showed a capability of the developed robot and feasibility of the proposed motion algorithm.

Key Words: Mechatronics, Robot, Rescue, Inspection, Crawler Robot, Triangular-Shaped Crawler, High-Step Climbing, Automatic Climbing Motion Algorithm

1. 結 言

近年、国内外において災害救助用ロボットとして様々なタイプの移動ロボットが開発されている。災害救助用ロボットは、操作者が無線遠隔操作することによって人の進入が困難な場所や危険な場所の情報を取得することができるため、床下、天井裏、プラント等の狭隘部での点検作業を行う目的でその利用が始まっている。たとえば、家屋の床下検査では、40cm程度の高さの隙間を移動し、転がっている配管や配線、部屋と部屋をつなぐ15cm程度の段差を乗り越える能力が必要とされる。また、搭載カメラ映像を見ながらの遠隔操作や、シロアリ等による木材の被害状況や基礎に入ったクラックの確認、ガス漏れや温度・湿度情報などの無線による遠隔取得機能が必要とされる。本論文では、上記の機能を有する移動ロボット機構の提案と、自動的に段差を超えるためのアルゴリズムの提案、実験による検証を目的とする。

これまでに開発されてきた移動ロボットは、その移

動形態によって、大きくクローラ方式と車輪方式に分けられる。クローラ方式は、接地面積が大きいことで悪路や坂道での走行や、多少の段差を越える場合に有効であるが、平地において移動速度を上げにくいことや、クローラベルトの形状によっては摩擦の大きな路面での旋回動作が行いにくいなどの問題がある。一方、車輪方式では、比較的平坦な路面において移動速度を上げることができ、旋回もスムーズに行えるメリットがあるが、段差越え能力は低く、砂地や摩擦の小さな路面においてスリップする問題がある。本論文で提案する移動ロボット機構では、高い段差を越えることを目的としており、路面や段差でのグリップを優先して、クローラ方式の移動形態を採用している。

災害救助用ロボットや各種点検用の移動ロボットでは、一般的に悪路での走行の他に瓦礫や段差等乗り越える能力が必要とされる。段差越えを行う移動ロボット機構には、単純にクローラの先端に傾斜を付けることで段差を越えられるように工夫したもの^{(1),(2)}、本体内部に重量マスを設置しそれを移動させることで段差を越えるもの⁽³⁾、米国 iRobot 社の PackBot に代表されるようなフリッパアームを複数搭載し、フリッパアームを段差に押しつけ車体を浮かすことで段差を越えるもの^{(4)~(7)}、へび型の利点を活かしてかま首

* 原稿受付 2009年2月26日。

^{*1} 正員、(独)産業技術総合研究所(☎ 305-8564 つくば市並木1-2-1)。

E-mail: kamimura.a@aist.go.jp

を持ち上げるようにして段差を乗り越えるもの^{(8),(9)}, 車輪方式やクローラ方式でリンク機構のアームを搭載しており, それを利用して車体を持ち上げることで段差を走破するもの^{(10),(11)}などが提案されている. 上記の移動ロボット全てに共通して段差を越える際に重要となるのが, ロボットの重心をいかに段差の上に移動させるかということである. 重心送り機構の実現が, 段差越えにおいて最重要課題となる.

また, 移動ロボットにおいて, 上下逆さまになったり, 穴にはまったりすることでデッドロック状態に陥る場合が多々あり, これを避けるための機構も重要である. 通常, 移動ロボットでは車体上面にカメラや各種センサを搭載しており, 上下逆さまになった場合の対応がなされていないのが現状である. その他, 搭載するセンサの種類, 数, 操作方式, 耐環境性能など議論する要素は多いが, 本論文では, 高い段差を乗り越えることができ, かつ現在の移動ロボットの問題点を解決するべく開発を行った特殊なクローラタイプのロボット機構について説明する. 以下, 2章ではその開発コンセプト, 段差越えのための機構についてまとめ, 3章でロボットの構造やシステムの詳細について述べる. 4章では自動段差登り手法の提案を行い, 5章でロボットハードウェアによる様々な実験について紹介する. 6章で, 結論と今後の課題について述べる.

2. 段差越え機構の提案

2・1 開発のコンセプト 床下検査等狭隘部での利用を目的とした移動ロボットの開発コンセプトについて以下でまとめる.

1. 小型・軽量構造

隘部での使用, 小回りのきく移動機構, 持ち運びの容易性, バッテリの持続性を考慮して, 小型・軽量構造とする.

2. 上下のない転倒に強い構造

ロボットが転倒した場合でも容易に復帰できるように上下のない構造とする.

3. 重心送り機構の実現

段差を越える際に必要となる重心送り機構を複数リンクの屈伸により実現する. このリンク機構により, 穴等にはまった際もデッドロックを回避できるよう工夫する.

4. 多種多様な内界・外界センサを搭載

ロボット自体が小型軽量であるため, 主な使用目的を情報収集として, ロボット位置の内界・外界情報を計測するためのセンサを搭載する.

5. 無線遠隔操縦・情報収集伝達機能

Fig. 1 Appearance of DIR-2 (Dexterous Inspection Robot).

Fig. 2 Assembly diagram showing 5 components and 8 driving parts.

無線による遠隔操作を可能とし, ロボット位置のカメラ映像やセンサ情報を遠隔で取得できるものとする. また, 将来的にロボット間で無線ネットワークを構成し, P2Pで情報を無線伝達可能なシステムとする.

6. グラフィカルで直感的な操作インターフェイス

現場に投入して, すぐに使用可能なシステムとし, なるべく直感的に操作が行え, ロボット位置における情報や検知した異常をユーザに分かりやすく提示するためのGUIを開発する.

次節では, 以上の開発コンセプトに基づき開発を行ったクローラタイプの移動ロボット機構について説明する.

2・2 段差越え可能な機構の提案 図1に設計を行った試作機の外観を示す. この試作機は, (株) AUC⁽¹²⁾ (群馬県安中市)と共同で開発を行った移動検査ロボットの試作2号機で, Dexterous Inspection Robotの頭文字をとって, DIR-2と呼んでいる. 図2にロボットを構成する5つのユニットと8つの駆動部を分かりやすく示した分解図を示す.

ロボットは, 平行配置された2つの三角形のクローラユニット (以下三角クローラ), 2つのリンクユニット (以下リンク A, リンク B), 直線型のクロー

Fig. 3 Folding state (left) and Extended state (right)
The link B and the straight crawler unit can be completely folded inside the triangular crawler unit in the side view.

ラユニット（以下直線クローラ）から構成される。各三角クローラの側面にはドーム状のセンサケースが配置されている。2つの三角クローラを中心穴には、リンク A 下部側面に突き出した軸（以下中心軸）がベアリングを介して挿入され、内蔵したサーボモータにより中心軸周りに 360° 回転駆動できるように設計されている。リンク A・リンク B 間、リンク B・直線クローラ間には、ジョイント結合されており、それぞれ結合回転軸周りに 240° の範囲で関節駆動可能となっている。リンク B 内にはバッテリーが格納されている。すべての回転軸は中心軸と平行となる向きに設計してある。

ロボットの自由度としては、2つの三角クローラおよび直線クローラのクローラベルトの駆動用に4自由度、2つの三角クローラを中心軸周りの 360° 回転駆動に2自由度、リンク A とリンク B 間の 240° 関節駆動に1自由度、リンク B と直線クローラ間の 240° 関節駆動に1自由度の計8自由度がある。通常の走行は、図1に示す状態で、左右クローラの駆動速度を調整することで前進、後退、旋回等を行う。

ロボットの構造は、三角クローラを中心軸周りに回転対称であるため、特に上下前後の区別を設ける必要はないが、カメラが設置してある方（図1左側）を前方とし、また図1の状態を仮に上下とする。本構造では、万一上下逆さまに転倒した場合でも、リンク A、リンク B、直線クローラ部分は、中心軸周りに 360° 自由に回転できるため、各自由度を駆動することで元の状態に復帰可能である。またセンサケースがドーム状であることで横転した場合でもデッドロックを回避できる構造になっている。

リンク B、直線クローラは、三角クローラ側面からみて、図3左図に示すように完全に正三角形内部に収納することができ、この状態でも走行可能である。このようにリンク B、直線クローラを収納することで、狭隘部での旋回を可能とし、さらにこの状態でコンパクトに持ち運べる利点がある。

Fig. 4 A series of climbing motion sequences. Marks in the figure show center of gravity position.

Fig. 5 Comparison of rotating crawler shape between triangular-shaped, square-shaped and circular-shaped.

本ロボット構造では、三角クローラ2つとリンク A のある前方部分の重量が最も重く（合計 5.6 kg）、リンク B (1.3 kg) および直線クローラ (1.7 kg) 部は軽く設計されている。リンク B と直線クローラは、図3右図のように後方に三角クローラの一辺の2倍程度まで伸ばすことができ、三角クローラの回転とリンク機構により段差に登ることができる。

2・3 段差登りの手順と三角クローラ形状の評価

図4に、提案ロボットによる段差登りの基本手順と計算した重心の位置を示す。

- (1) まず、三角クローラが段差側面に接触した状態から、三角クローラを段差に引っかけるように前方に回転させる（図4(a), (b)）。その際、クローラベルトを前進方向に駆動しておくことで段差側面および床面との間のグリップを確保する。
- (2) リンク A とリンク B 間、リンク B と直線クローラ間の角度を調整しながら、三角クローラ部分を段差面に載せる（図4(c), (d)）。
- (3) そのまま前進させ、ロボットの重心が段差面に移った状態で、リンク A から後の関節を駆動して直線クローラを段差面まで引き上げる（図4(e), (f)）。

以上の動作を行うことで、ロボットの約 1.5 倍程度の段差まで乗り越えることが可能である。一方、登ることができる段差面の奥行きは、図4(f)の状態の後転しないための条件として、重心の投影位置が段差面上

Fig. 6 Photos of DIR-2

にある必要性から、奥行きとして 18cm 以上が必要であると計算される。

図5は、軸回転対称な図形として、比較のため同じ高さの三角クローラ、正方形クローラ、円形クローラの回転軸位置（重心位置）を比較した図である。図から正三角形のクローラ形状の重心が他の2つよりも約2割も低い位置にあることが分かる。それにより、他回転形状よりも同じ高さの段差に登る際に必要なリンク長を短く設計でき、さらに低重心のため急傾斜の登坂に有利であるなどのメリットがある。また、正方形のクローラ形状よりも、一辺の長さが長い場合、より高さのある段差にもエッジを引っかけることができる。以上の理由から三角形のクローラを採用した。

3. ロボットハードウェア

3・1 試作ロボットの開発 図6に、開発した試作2号機、DIR-2の外観と各部分の機能を示す。表1にDIR-2のハードウェア仕様をまとめる。DIR-2では、図7に示すロボット用サーボモータ2種類を新規に開発した。図7左は、クローラベルトを駆動するための速度重視版で、右はリンクの駆動や三角クローラの回転をさせるためのハイトルク版である。制御基板には、磁気式エンコーダ、モータドライバ、電源回路、CPU、RS-485 通信チップが搭載されている。モータ搭載のCPUには、360°位置速度制御、回転速度制御、動作角度を制限するソフトリミット機能、原点位置の自由設定機能、回転量を測るためのパルスカウン機能、各種センサフィードバック機能がプログラムされており、簡単なコマンドで駆動できるよう設計されている。本サーボモータにより、移動や段差越え時により細かな制御が行えるようになった。ロボットの筐体は、防塵・防滴構造になっており、埃のある環境や小雨程度

Table 1 Specifications of DIR-2

Item	Value
Size	Folding state: 35cm(W)×24cm(H)×27cm(L) Extended state: 35cm(W)×24cm(H)×64cm(L) One side of triangular crawler is 27cm in length.
Weight	8.6 kg
Moving method / Max. velocity	Triangular shaped crawler and straight crawler / Max. 2 km/h
Gradeability	Max. 30 degrees (depends on friction of slope)
Turning circle radius	0 cm
D.O.F	8 (crawler (4), link mechanism (2), axial rotation of triangular-shaped crawler device (2))
Actuators	Two types of A10 developed servo motors (2.4 Nm (18.5VDC) for crawlers and 8.0 Nm (18.5VDC) for others)
CPU	Renesas SH7145 on main-controller board and Atmel ATmega168 on each servomotor, sensor board and interface board
Internal communication	RS485 multi-drop connection (115.2k bps)
RF communications	Futaba 2.4 GHz RF modem and 1.2 GHz wireless video transmitter (Covered 200 m wide area in visible site)
Battery	Two Li-Po batteries (18.5V 8.4 Ah in total)
Operation time	2 to 3 hours (depending on situation)
Sensors / devices	Wide-angle camera, Telephotographic camera, Illuminometer, Infrared proximity sensor, Thermopile sensor, 3-axis acceleration sensor, Gyro sensor, Digital compass, Power LEDs, Digital temperature and humidity sensor, GAS sensor (CH4, CO)

Max. velocity 150 rpm Max. torque 2.4 Nm (18.5 V) Max. velocity 15 rpm Max. torque 8.0 Nm (18.5 V)

Fig. 7 Developed A10 servo motors. The left is for driving crawler belt and the right is for other parts requiring high torque.

Fig. 8 Schematic of DIR-2 system configuration.

であれば使用可能となっている。また、収納式ハンドルを備えており、持ち運びの容易性など実用性・利便性も考慮している。

3・2 ロボットのシステム構成 図8にDIR-2のシステム構成図を示す。ロボットハードウェア部には、メインコントローラ、電源・カメラ・照明管理用インターフェイスボード、8つのサーボモータ、左右センサケースが含まれ、外部のホストPCからコントロールBOXを介して無線によるコマンドの送受信やセンサ情報、カメラ映像の取得を行っている。ロボット内は、複数のCPUが図8太線に示すように一つのシリアル通信バス(RS485)で結合され、各CPU内に設定された固有のコントロールテーブルに対してメインコントローラから書き込み、読み込みを行うことで全体を制御している。外部のホストPCからも無線により、同様にメインコントローラ内のコントロールテーブルを読み書きすることができ、各種動作制御を行える仕組みになっている。たとえば、取得したセンサ情報等は、各CPUのコントロールテーブル上で随時更新されており、ホストPCからメインコントローラを介して転送コマンドを送ることで情報を取得することができる。

本ロボット機構では、2つの三角クローラはそれぞれ軸周りに360°回転するため、リンクA側と三角クローラ間で電源ラインと通信ラインを通常の配線で結ぶことができない。そこで、間にスリップリングと呼ばれる回転体と固定機器間での通電を行う装置を回転

Fig. 9 Screen image of interface software on host PC

軸内に設置することで、三角クローラ側での十分な電源容量と安定した通信速度を確保した。

3・3 操作インターフェイス 図9に、操作インターフェイスのキャプチャ画面を示す。操作画面は、タッチパネル式になっており、画面に触れると、その場所に応じたコマンドが無線でロボットに伝達される。同時にロボット側の情報も無線で取得され、インターフェイス画面に反映される。

ロボットの移動操作は、図9のモニター画面のロボットカメラ映像を見ながら、その画面を図9矢印に示すように指でなぞることで前進・後退・旋回動作を行う。リンク角度の変更等は、モニター画面下のボタンで操作できる。一連のボタン操作は、図9左下のマクロボタンを押すことで記録を開始し、ロボット側に時系列のキーシークエンスデータとして保存される。再生する際もマクロボタンを押すことで記録動作を一発で起動できる。この機能を使うことで、決められた段差を乗り越えるシークエンスをあらかじめ作成しておくことで、操作者によらず段差越え動作が実現できる。

その他、カメラ映像のズームや、リアルタイム映像の録画・再生等が可能である。

4. 自動段差登り動作の実現

これまでブロックや階段のような段差登り動作は、決められた高さを登るための動作キーシークエンスとして記録し、再生することで行っていた。しかし、異なる高さの段差や、途中滑り等でタイミングがずれてしまった場合に対処できない問題があった。

本章では、段差登り時の静力学的・幾何学的な考察を元に、段差の高さによらず自動的に登るためのアルゴリズムを提案する。提案したアルゴリズムは、5章のハードウェア実験において有効性の検証を行う。

4・1 段差登り時の静力学・幾何学

DIR-2 による段差登りの動作手順は2・3節および図4に示した通りである。2・3節における(1)段差側面への接触、(3)直線クローラの引き上げ動作は容易に実現できるので、ここでは(2)の三角クローラの段差面への持ち上げ動作について考察を行う。

図10は、段差登り時の力とトルクを示している。 R_1 , R_2 は面からの抗力、 T_1 , T_2 , T_3 はそれぞれモータのトルク、 F_2 は接触点におけるトルク T_1 による力、 F_1 がクローラ推進力、摩擦力その他のトルク T_1 の接線方向の成分である。図10左の状態では、 R_1 , R_2 が面に対して進行方向側に傾いており、登る際に滑り落ちない状態を示している。この状態を保持するようにクローラを駆動する。

三角クローラの前方回転方向に一定トルク T_1 をかけているのは、段差のエッジで $F_2 > F_1$ になった際に三角クローラが前方に回転し始めることを利用して段差に登ったことを検知するためである。三角クローラが回転を始める位置は、段差エッジでの F_2 と F_1 のバランスで決まり、 T_1 が大きすぎると段差に登る前に前方へ回転してしまい、小さすぎると段差のエッジを大きく越えても回転しないことになる。 T_1 の要件として、図10左の状態でも最低三角クローラを段差側面に押しつけることができ、かつ最大三角クローラ下部が面から離れて回転しない範囲で値を選択する必要がある。

図11は、段差登り時の3つの姿勢・形における計算した重心位置と転倒方向を示したものである。段差が高くなるとリンクを伸ばす必要があり、直線クローラの接地点と重心の投影位置が近づくため不安定になりロボットが後転する場合がある。図11左図の場合、直線クローラの接地点よりも右側に重心があるため右に倒れる（後転する）。図11中央の場合、ほぼ一致しているのでどちらへも倒れる可能性がある。図11右図では、必ず段差面側に倒れる。よって、ロボットが段差面に対して後転しないための条件として、まず図11左の状態を避けるためにリンクBを鉛直になるように制御し、リンクBを挟んでリンクAと直線クローラが反対方向にあること、また図11の中央のようにリンクが一直線になる状態をリンクの可動限界と設定すれば良いことが分かる。

4・2 自動段差登りアルゴリズムの提案

4・1の考察を元に、高さによらない自動段差登りアルゴリズムを提案する。使用するセンサ情報は、リンクAの鉛直軸からの姿勢角度（加速度センサ値より計算） α と

Fig. 10 Forces and Torques in climbing process.

Fig. 11 Analysis of COG positions in different postures and shapes while climbing process.

Fig. 12 Parameters for climbing motion algorithm.

各モータの角度情報だけである。それらより、ロボットの姿勢を計算する。図12に示すように、リンクA・B間の角度を θ_1 、リンクB・直線クローラ間の角度を θ_2 、三角クローラのリンクAに対する回転角度を θ_3 、三角クローラの鉛直軸に対する回転角度を θ_4 とする。 $\theta_4 = \theta_3 - \alpha$ の関係にある。以下に、段差登りのアルゴリズムを示す。

- 1: 前提として段差側面に対して三角クローラ双方が対面・接触（正対）した状態にする。
(図4(a), $\theta_1 = 30^\circ$, $\theta_2 = 120^\circ$)
- 2: 2つの三角クローラを段差側面に沿うように一定のトルク $T_1 (=2.5 \text{ Nm})$ で中心軸周りに回転させる。以降、トルクを保持。
- 3: 4つのクローラを同じ一定の推力 (20 N) で駆動し、前進移動とグリップ力を確保する。以降、推力を保持。
- 4: 三角クローラが壁面まで回転したことを検知したら (図4(b), $\theta_4 = 30^\circ$), θ_1 を現在の角度から 180°

Fig. 13 Hardware experiments on different-height steps' climbing (10 cm, 20 cm and 30cm) using proposed climbing motion algorithm.

(リンク A・B が直線状態) になるまで一定速度 (0.25π rad/s) で回転駆動する。(コマンド送信後モータが自動で実行)。

- 5: リンク B の鉛直からの角度 $\theta_1 - \alpha$ の値が負の場合, リンク B が鉛直になるように θ_1 を制御する。
- 6: θ_1 が 100° を越えた時点で, θ_2 を最大 180° になるまで一定速度 (0.25π rad/s) で回転駆動する (コマンド送信後モータが自動で実行)。(図 4(c))
- 7: 三角クローラが段差面に着地したことを検知したら (図 4(d), $\theta_4 = 120^\circ$), 以下を実行し 8 にいく。そうでない場合は 5 に戻る。

θ_1 を固定し, θ_2 を最大 180° になるまで一定速度 (0.25π rad/s) で回転駆動する (コマンド送信後モータが自動で実行)。三角クローラの中心軸周りのトルクを解除 (回転をフリーにする)。

- 8: リンク B, 直線クローラの段差面への引き上げ動作を実行する (図 4(e)→(f))。

5. ハードウェア実験

5・1 自動段差登りアルゴリズムの検証 4・2 の自動段差越えアルゴリズムの検証実験を行った。図 13 に, 段差 (ブロック) の高さを 10cm (1 個), 20cm (2 個), 30cm (3 個) とした場合の段差登りの様子を示す。図 13 から, 高さが様々に変化した場合も, 三角クローラの回転を利用した段差検知により動作を変更することでスムーズな段差登りが実現できていることが分かる。本実験から, 提案した段差登りアルゴリズムは, 未知の高さの段差に対応可能であることを確認した。実験の様子は, ホームページ⁽¹³⁾ をご覧頂きたい。

5・2 一般環境における段差越え実験 図 14 における実験では, 一般環境における段差を想定して, 階段, 円筒形の障害物, 屋外における不定形な切り株登

り, またチャレンジとして 36cm の高段差について自動段差登りアルゴリズムの検証を行った。階段登り実験では, 一段毎に自動段差登りアルゴリズムを起動することで, ちょうど 1 階分にあたる段数を全て走破した。また, 提案のアルゴリズムは, 直角の段差に限らず, 円筒形状のものでも登ることができることを確認した。さらに, 最大 36cm までの段差登りが可能であることを確認した。この高さは DIR-2 の約 1.5 倍の高さにあたり, 本機構を用いれば, より小型で階段を登るロボットを実現できることを示している。

6. 結論と今後の課題

本論文では, 小型でありながら約 1.5 倍の高さの段差まで走破可能なクローラロボット機構を提案した。ロボットは, 中央をシャフトで結合された 2 つの三角形状のクローラユニット, 直線状のクローラユニット, およびシャフトと直線クローラを結ぶ 2 リンク機構から構成され, 全部で 8 自由度ある。段差を登る際は, クローラによるグリップとリンク機構を駆動して, 最も重い三角クローラ部を先に段差に載せ, その他を後から持ち上げることで行う。また, 段差の高さによらず, 自動的に段差に登るためのアルゴリズムを提案し, 実験によりロボット機構と提案手法の有効性を確認した。実験では, 人工的な段差 (2 次元問題) は登れる事を確認しているが, 災害後の瓦礫など予測できない不定な凹凸がある場所 (3 次元問題) では, 未だロボットの移動制御において難しい問題が残されている。また, 本論文で提案した手法では, ロボットを高い段差に載せることはできるが, 高い段差から滑らかにおろすことはできない。20cm 程度の高さであれば, そのまま落ちて問題ないが, それ以上になると機構への負担が大きく, 今後, ロボット自身の頑健性の向上に

Fig. 14 Hardware experiments on climbing in various situations.

加え、自動段差降り手法の開発も課題の一つとして考えている。

謝 辞

本研究のロボット開発において、(株)AUC⁽¹²⁾の蓮見啓二氏と村川卓也氏にはロボットの企画や設計など多大なるサポートを頂いた、ここに謝意を表する。また、4章の自動段差登り動作の実現において、(独)産業技術総合研究所 知能システム研究部門の黒河治久氏に幾何学的な解析、ロボットの制御手法に関してアドバイスを頂いた。ここに謝意を表する。

文 献

- (1) Woosub Lee, Sungchul Kang, Munsang Kim, Mignon Park, ROBHAZ-DT3: teleoperated mobile platform with passively adaptive double-track for hazardous environment applications, *Proceedings of IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, (2004), pp. 33 - 38.
- (2) Mesa Robotics, Inc. "Matilda robotic platform". Mesa Robotics homepage. (online), available from<<http://www.mesa-robotics.com/matilda.html>>, (accessed 2009-2-26).
- (3) Katsuura, T., Ishida, H., Nagatani, K., Tanaka, Y., "Development of a Searching Mobile Robot loaded with a 3D Range Sensor observable from Many View Point in the Rubble", *Proceedings of JSME Robotics and Mechatronics Conference 2004*, 2P2-H-22 (2004-06).
- (4) Brian Yamauchi, PackBot: A Versatile Platform for Military Robotics, *Proceedings of SPIE on Unmanned Ground Vehicle Technology VI*, vol. 5422, (2004), pp. 228-237.
- (5) Kazunori Ohno, Shouich Morimura, Satoshi Tadokoro, Eiji Koyanagi and Tomoaki Yoshida, Semi-autonomous Control System of Rescue Crawler Robot Having Flippers for Getting Over Unknown-Steps, *Proceedings of IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, (2007), pp. 3012 - 3018.
- (6) Miyanaka, H., Wada, N., Kamegawa, T., Sato, N., Tsukui, S., Igarashi, H., Matsuno, F., Development of an unit type robot "KOHGA2" with stuck avoidance ability, *Proceedings of IEEE/RSJ Int. Conf. on Robotics and Automation (ICRA)*, (2007), pp. 3877 - 3882.
- (7) Moosavian, S.A.A., Semsarilar, H., Kalantari, A., Design and Manufacturing of a Mobile Rescue Robot, *Proceedings of IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, (2006), pp. 3982 - 3987.
- (8) Masayuki, A., Takayama, T., Hirose, S., Development of "Souryu-III": connected crawler vehicle for inspection inside narrow and winding spaces, *Proceedings of IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, (2004), pp. 52 - 57.
- (9) Kamegawa, T., Yamasaki, T., Matsuno, F., Evaluation of snake-like rescue robot "KOHGA" for usability of remote control, *Proceedings of IEEE International Workshop on Safety, Security and Rescue Robotics (SSRR)*, (2005), pp.25-30.
- (10) Sato, N., Matsuno, F., Shiroma, N., FUMA: Platform Development and System Integration for Rescue Missions, *Proceedings of IEEE International Workshop on Safety, Security and Rescue Robotics (SSRR)*, (2007), pp.1-6.
- (11) Guarnieri, M., Debenest, R., Inoh, T., Fukushima, E., Hirose, S., Development of Helios VII: an arm-equipped tracked vehicle for search and rescue operations, *Proceedings of IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, (2004), pp. 39 - 45.
- (12) AUC Inc. (online), available from<<http://adv.u-corp.jp/index.html>>, (accessed 2009-2-26).
- (13) Akiya Kamimura "DIR-2 performance movies". (online), available from<<http://staff.aist.go.jp/kamimura.a/dir2/movie.htm>>, (accessed 2009-2-26).