

## 探索型レスキューロボットのインテリジェント化の研究

### A Development of Intellectual Rescue Robot

服部 剛史<sup>†</sup>, 平野 慎也<sup>†</sup>, 羅 志偉<sup>††</sup>, 加藤 厚生<sup>†††</sup>

Tsuyoshi HATTORI<sup>†</sup>, Shinya HIRANO<sup>†</sup>, Z.W. LUO<sup>††</sup>, Atsuo KATO<sup>†††</sup>

**Abstract** This paper describes on a first step development of self controlled rescue robot. In recent years, we were suffered from serious disaster caused by earthquakes, so we have to take all possible measure against large earthquakes. Many seismologists say some big earthquakes will occur within next thirty years, and then several active studies of rescue robots are developing now. Generally an operator of robot is required special operating skill, but in the field of disaster it will be difficult to look for a skilled operator. Therefore we are developing self controlled rescue robot works for finding a person under the collapsed building. In this study we intend to give some intelligence to our hand made rescue robot AIT-ReBo.1. As first step of that we achieved self configuration control to continue progressive motion of ReBo.1 when it turns over on its side using G-sensor. TV camera image on console display get from ReBo.1 is waving with progressive motion of it because it makes bending traveling wave on its body for propagation, then we made holding image system by synchronous selection of movie frame with TV camera angle. By the holding image system, we can see arbitrary angle images, and even if ReBo.1 turn over on its side we can see vertical images. Usually, the console operators intend to search sufferer in dark area on the camera images, then we made aerial brightness control imaging system.

#### 1. はじめに

##### 1.1 研究背景

1995年に発生した阪神淡路大震災では6400名を超える尊い命が奪われた。更に2004年の新潟中越地震やスマトラ沖地震の津波被害など、現在でも地震災害によってもたらされる被害は後を絶たない。また、今後30年間に我が国の太平洋岸でいわゆる南海・東南海地震(M8.1~8.5)が起きる確立は40~60%といわれており<sup>1)</sup>地震災害への対策は重要である。

阪神淡路大震災の経験から、瓦礫の中に閉じ込められた要救助者は3日を過ぎると、その生存率が5%以下になってしまうことがわかっている<sup>1)</sup>。したがって発生後3日以内に要救助者を探索救助しなければならぬ。この重要な時間を“黄金の72時間”と呼ぶ<sup>1)</sup>。しかし、災害現場では家屋や倒壊した瓦礫に阻まれ要救助者の探索が困難であったり、2次災害の危険があるなど人間の救助者による作業が困難であった。

##### 1.2 レスキューロボット

そこで、人間に代わって要救助者の探索や救助を行うレスキ

ューロボットの研究が進んでいる。レスキューロボットは大きく2つに大別される。すなわち、走破性を生かして要救助者を探し出す“探索型レスキューロボット”と、アクチュエータの力を利用して瓦礫を撤去し要救助者を救出する“救助型レスキューロボット”の2種類である。

しかし、これらのロボットの多くは直接人間が操作する形のものも多く、さらに高い走破性を得るため複雑な制御を行う必要があり、熟練者しか操作できないという欠点がある。災害現場においては熟練者がいるとは限らず、たとえ熟練者であっても長時間複雑なロボットの操作を行うことは負担が大きい。また、ロボットが活動中に2次災害に遭ったり、要救助者を探し瓦礫の奥深くまで進入して行った場合にはロボットとの通信が途切れる可能性が高く、制御不能に陥ってしまう。こうした観点から、レスキューロボットのインテリジェント化が必要である。

レスキューロボットのインテリジェント化とは、ロボットが作業や目的を与えられたとき、人間の操作や監視を要求することなく適当なセンシングシステムを用いてロボット自身の状態や外界の状況に対してセンシングを行い、バッテリー残量や故障箇所など自身の内部状態、地面に対する傾きや移動速度など環境における自身の状態、また周囲の温度や瓦礫の段差など災害現場の状況といった情報を収集し、その情報を元にした行動決定や外部のシステムにその情報を伝達する能力のことである。

<sup>†</sup> 愛知工業大学 大学院工学研究科 (豊田市)

<sup>††</sup> 理化学研究所バイオ・ミメティックコントロール研究センター  
環境適応ロボットチーム (名古屋)

<sup>†††</sup> 愛知工業大学 機械学科 知能機械工学専攻 (豊田市)

救助型レスキューロボットはその作業内容から大きなアクチュエータ出力が求められ、人が乗り込むことができる重機のような形態が多い。これに対し、探索型レスキューロボットは災害発生の初期段階において人間では探索できない危険区域に入り込んで作業を行うため、先に挙げた2次災害の危険や通信断絶の可能性は高い。よって探索型レスキューロボットのインテリジェント化は早急に取り組むべき課題である。

### 1. 3 研究目的

本研究では探索型レスキューロボットに必要なインテリジェント機能を以下の観点から模索していく。

- ロボットの自律行動に寄与
- 操作者の負担を軽減

これらを目標にロボットのインテリジェント化を目指す。

本論文では、最初に研究対象とする探索型レスキューロボットを挙げ、まず運動制御のインテリジェント化として姿勢制御センサについて述べる。次に要救助者探索のインテリジェント化としてカメラ画像の処理について述べる。

## 2. 探索型レスキューロボット AIT-ReBo.1

本研究では、愛知工業大学・生体工学研究室において製作された探索型レスキューロボット“AIT-ReBo.1”<sup>2)3)4)</sup>(以下 ReBo.1と表記)を使用する。ReBo.1の外観をFig.1に示す。ReBo.1は人間の救助者が入ることのできない瓦礫の隙間に入り込み、災害現場の情報収集や要救助者を探索することを目的としたロボットである。

ReBo.1はユニット型の構造をしている。単一のユニットにはピッチ、ヨー方向へ屈曲する2つの関節と長軸方向へ伸縮する1つの関節の合わせて3自由度を持ち、関節を駆動するアクチュエータとバッテリー及びコントローラを内蔵している。

このユニットを多数連結して一台の長いロボットとし、体幹を屈曲させて、体表面に進行波を生成することで体表面と地面との摩擦を利用して移動する。車輪タイプのロボットであれば

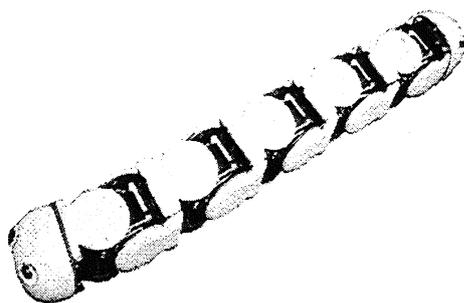


Fig.1: Outside view of ReBo.1

横転した際車輪と地面の接触が確保できなくなるために移動不能になる。それを解決するためには、車輪を全周に配置したり、車輪の配置を変化できるようにしなければならない。しかし、ReBo.1は車輪や足を実装しないことで、横転した場合も新しい接地面に進行波を生成するように関節運動を変更することで、再び移動を続けられる利点がある。その他、体全体を円弧状に屈曲しながら前進後退をすることで行う方向転換と、体の長軸に対し横方向に平行移動することができる。ReBo.1の基本性能をTable.1に挙げる。

Table.1: Basic performance of ReBo.1

Length(5Unit・HeadUnit)	65cm
Weight(5Unit・HeadUnit)	2.75kg
Operation time	40minute
Max speed	13.8cm/sec

## 3. 運動制御のインテリジェント化

### 3. 1 姿勢制御センサ

ReBo.1は横転した際、元の姿勢に戻さずとも駆動軸を変更し移動を続けられる。災害現場はおおむね不整地であり<sup>5)</sup>探索中にロボットが横転する可能性は高く、これは有用な機能である。そこで、床面に対する ReBo.1の姿勢をセンシングし運動制御システムにフィードバックすれば、横転した姿勢に適応した運動制御に変更し行動を続けることができる。これにより横転時も操作者は姿勢建て直す操作をする必要がなくなり、負担が軽減される。またロボットが自律行動する際にも、探索を続ける上で自身の状態を知ることは必要不可欠なものである。

### 3. 2 加速度センサ

ロボットの姿勢を検出するセンサとしてレートジャイロが多く利用されているが、これは角速度を計測するものであり、姿勢を検出するには積分操作を要する。そこで本研究では姿勢を直接検出することにし、重力加速度方向からの傾きを検出することにした。

計測センサには、小型・軽量で且つ安価であることから静電容量型3軸加速度センサ“ACB302”を用いた。これは直交する3軸における加速度を計測することができる。このセンサを ReBo.1に搭載し3軸で検出された重力加速度成分から重力の方向を計算によって求める。Fig.2にセンサの外観を、Table.2に性能を示す。

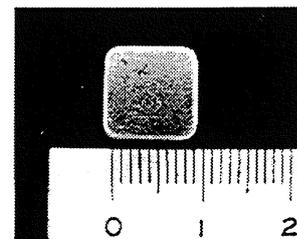


Fig.2: ACB-302

Table.2: Performance of G-sensor

Supply Voltage	2.7~5.5V
Frequency Response	DC to 15Hz
Size(WDH)	9.0×9.0×7.0mm
Weight	1.3g

Fig.3はセンサを ReBo.1に搭載し、前進移動した時の出力をオシロスコープで観察したものである。停止した時重力方向と同じ向きになる軸を計測した。2.2Vの太線は停止時の出力を示している。

波形には停止時に見られる平定した重力加速度に比べ、運動時には約 150Hz で振動する高周波のノイズが見られる。これはアクチュエータ駆動ノイズや移動時に外装と床面の接触によって生まれる微振動が原因と考えられる。そこでパタワ

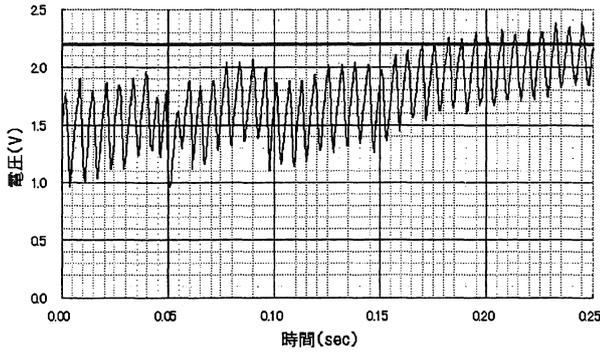


Fig.3: Output signal from G-sensor

ース・2次ローパスフィルタを用いた。更にコントローラに内蔵するAD変換器のダイナミックレンジに合わせるため増幅を行った。Table.3 に設定した値を示す。

Table.3: Parameter of circuit

Cutoff frequency	7.5Hz
Amplification level	5.5

AD変換によって得た電圧値から式(1)を用いて軸ごとに重力加速度成分へ変換した。Gは重力加速度に対する割合で、 $v_m$ は入力電圧であり、 $V$ は予め測定した値で重力加速度方向と軸が直交している時を $V_0$ 、同方向の時を $V_{+n}$ 、逆方向の時を $V_{-n}$ とした。 $n$ はそれぞれの軸を表す。

$$G_n = \frac{2(v_m - V_{0n})}{V_{+1n} - V_{-1n}} \quad (1)$$

これにより得られたGを用い2つの軸によって作られる平面上の重力加速度の傾き $\theta$ を式(2)で計算する。例として X, Y 軸平面での計算の様子を Fig.4 に示す。

$$\theta = \tan^{-1} \frac{G_y}{G_x} \quad (2)$$

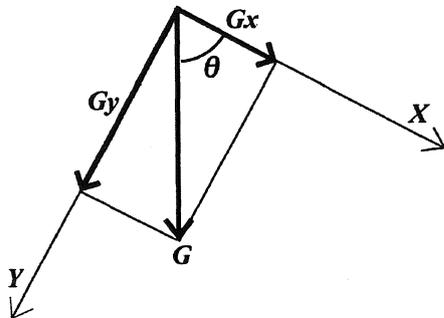


Fig.4: G component and tilt angle  $\theta$

製作したセンサを ReBo.1 に搭載し、横転実験を行った。製作した回路の外観を Fig.5 に示す。

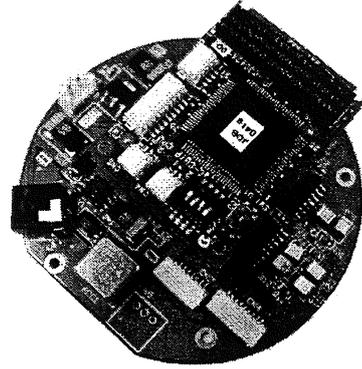
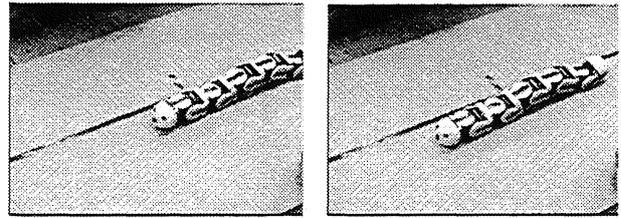
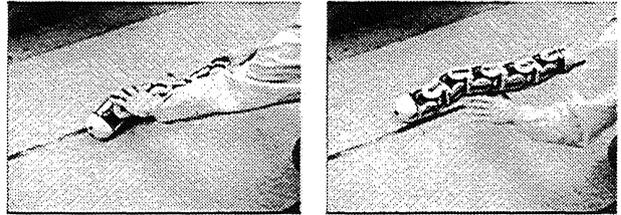


Fig.5: Outside view of G-sensor circuit

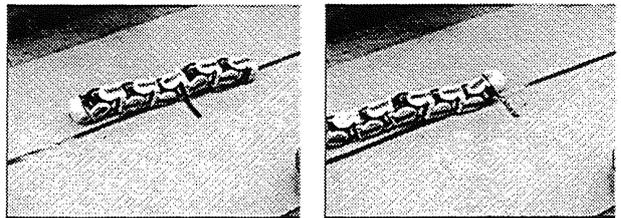
実験の様子を Fig.6 に示す。はじめに(a)では ReBo.1 が通常の前進移動をしていることがわかる。次に(b)で外乱を加えて ReBo.1 を横転させた。右側の横転直後の写真ではまだ関節を床面に垂直な軸で屈曲させており、このままでは移動を継続できないことがわかる。約1秒後、(c)では横転を検知して制御軸を自律的に変更し、床面に対し水平な軸で関節を屈曲させ、横転したままの姿勢で移動を継続していることがわかる。これにより、姿勢制御センサの有効性を確認した。



(a) Strait progressive motion



(b) Overturn by external force



(c) Continue progressive motion

Fig.6: Self configuration control against overturn by external force

#### 4. 要救助者探索のインテリジェント化

##### 4. 1 カメラ画像の処理

要救助者の探索機と言えば、新潟県中越地震で土砂に埋もれた車から幼児が救出された報道が記憶に新しい。このとき

使用された機器はLionwings社で開発された“Sirius”<sup>6)</sup>である。これは電磁波を放射し反射波を解析することで要救助者の鼓動や呼吸を判別するものである。その他、非熟練者にも運用可能な人命探査装置をめざした、サーモグラフィを用いた視覚支援機能の研究がある<sup>7)</sup>。

しかし“Sirius”は放射装置や画面が必要であり大きく、サーモグラフィは1kg以上<sup>8)</sup>と重いため、これらの人命探査装置はReBo.1への搭載は困難である。

そこで本研究ではReBo.1や現在研究されている探索型レスキューロボットの多くに搭載されているCCDカメラに着目し、画像処理を行うことで探索補助機能を付加した。

4. 2 移動中の映像安定

ReBo.1に限らず探索型レスキューロボットに多くある蛇を模したロボットは、関節を屈曲させ移動するので搭載されているカメラも揺られてしまい、ロボットから送られてきた映像をそのまま表示すると、操作者がVE(Virtual Environment)酔いを起こしてしまう。また、ReBo.1は横転した際自律的に屈曲関節を変更することで横転姿勢のまま移動を継続できるようになったが、このときカメラ映像も横転したまま表示されるので操作者の負担が大きい。そこで本節では、ロボットから送られた揺れ動く映像を安定表示することを目的とした。

現在の映像表示システムとReBo.1制御システムの間をFig.7に示す。PCから各ユニットの関節角度が送信され、ReBo.1は移動動作を行う。先頭に搭載されたカメラの映像は、映像用の無線機を介しPCにキャプチャされディスプレイに表示される。

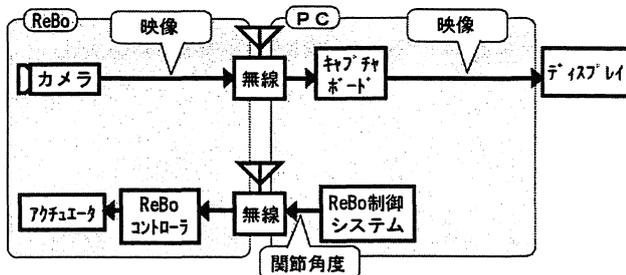


Fig.7: Basic control system and image system

4. 2. 1 移動中の映像安定

ReBo.1が移動する際カメラを搭載するユニットも屈曲し、カメラ映像は上下に激しく揺れる。これをある一定の関節角度の映像だけ選別して表示するコマ落とし手法を用いて、揺動する映像を静止させる。

移動中各ユニットの関節角度から、床面に対するカメラの角度が計算できる。しかし、映像は秒間30フレームしか取得できないため、選択した角度と同一のカメラ角度の映像を得られる可能性は低い。そこで、システムが画像を取得する度に、その画像とカメラ角度とを組み合わせ一時的に画像バッファへ保存しておく。次に、ユニットの関節角度が1周期分変化したとき、保存されているカメラ角度から、表示したいカメラ角度に最も近い角度と組になっている画像を表示する。この流れをFig.8に示す。

制御システムと、画像選別システムの間をFig.9に示す。ReBo.1制御システムから関節角度を取得している。

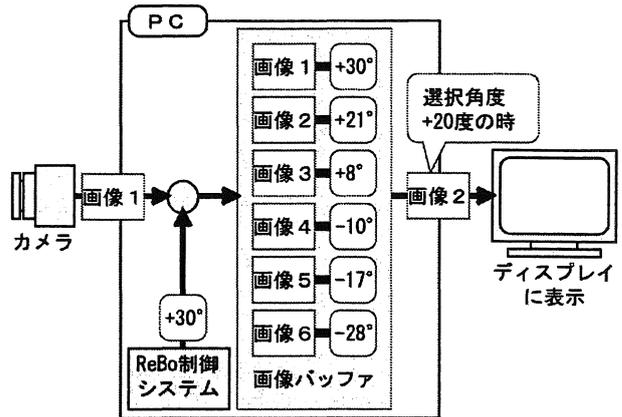


Fig.8: Holding image system synchronized with motion of ReBo.1

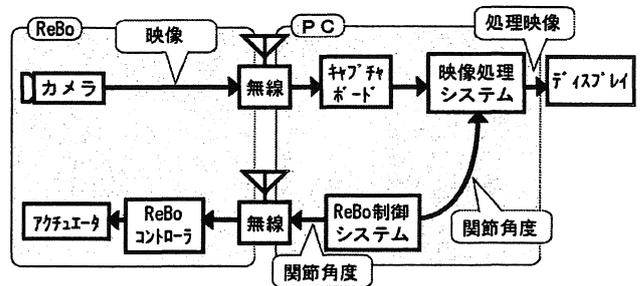


Fig.9: Relation between control system and holding image system

実際に動作させたときの画像をFig.10に示す。“a~e”が未処理画像で“f~j”が処理後の画像である。まず未処理画像について説明する。“a”はカメラが下を向いた状態で画面内には床面が多く映っている。徐々に上方へと向きを変え“c”で最上となる。再び下方へと向きを変え“e”で下を向いた状態となる。次に処理後の画像について説明する。ここでは表示するカメラ角度を0度とした。“f”では前回取得された画像が表示されている。これは“h”まで表示され続け、未処理画像においてユニットの関節角度が1周期変化した“c”の時点で画像バッファから、選択したい0度に最も近い画像を選別し“i”で処理後の画像が更新されていることが分かる。処理後の“f~j”を見ると、床面が画面の半分程の部分に表示され0度付近で映像が静止していることがわかる。

4. 2. 2 横転時の画像回転

ReBo.1が横転した姿勢で移動を継続したとき、カメラ映像も横転したまま表示される。そこで姿勢制御センサから得られるReBo.1の傾きを用いて映像を回転させ、操作者に水平な映像を提示するシステムを構築する。しかし、ReBo.1の傾きに従って常に映像を回転させると、少しの傾きで映像が回転してしまうため、ReBo.1の形状が先頭部から見て四角形に近いことから、映像の回転は90度ごとに行うことにした。

映像の回転には三角関数を用い、回転時にできる色の欠けを線形補間法を用いて補正した。回転角度がθのときの回転行列式を式(3)に示す。(X, Y)は回転後の座標で(x, y)は元画像の座標である。

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \quad (3)$$

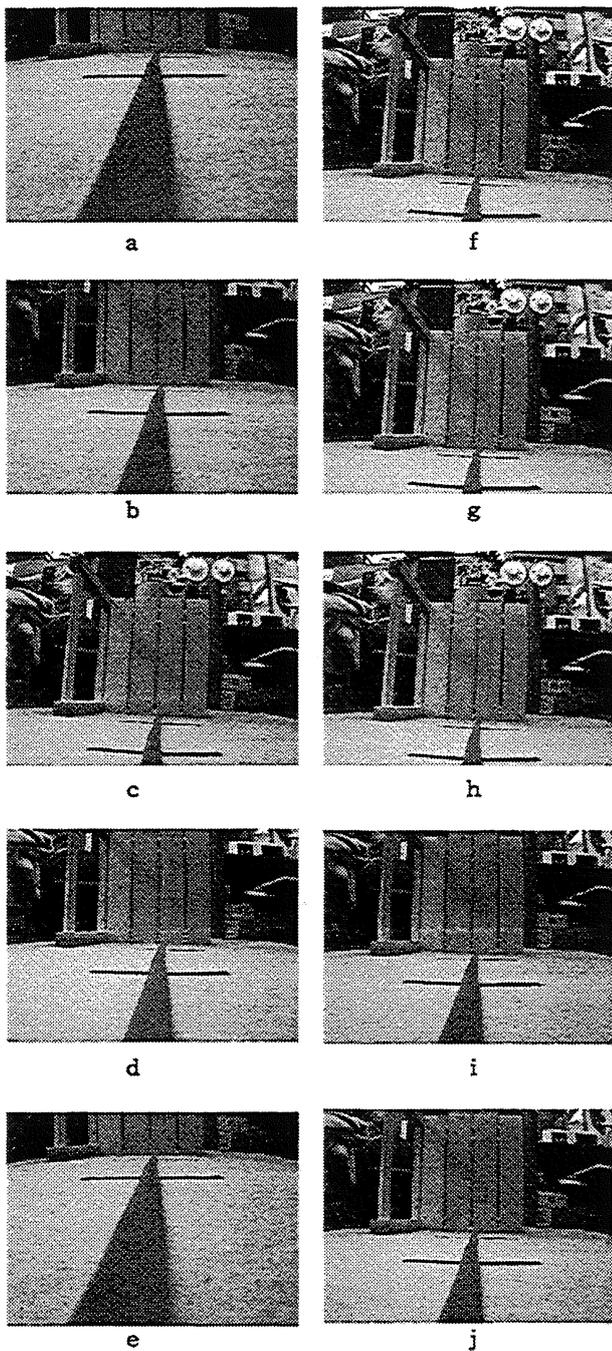


Fig.10: Held images during progressive motion

制御システムと、映像回転システムの関係を図.11に示す。姿勢制御センサによって得られたReBo.1の傾きは、無線を介してReBo.1制御システムに送られる。この傾きを利用し、映像を回転させる。

実際に動作させた画像を図.12に示す。それぞれ左側が処理前の画像で、右側が回転処理を行った後の画像である。回転処理を行うことによって、提示される映像は水平が保たれていることがわかる。

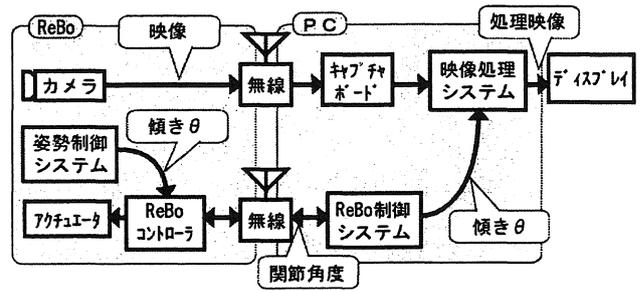


Fig.11: Relation between control system and holding image system

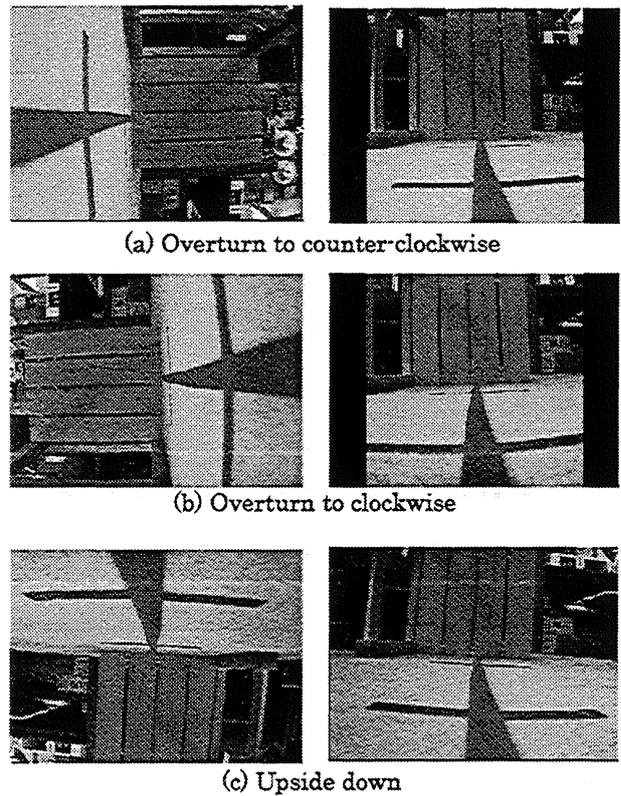


Fig.12: Keep vertical image

#### 4.3 暗所でのカメラ画像認識補助

前節により、移動動作中でも安定した映像が得られるようになった。次に、その映像を処理し要救助者を探索する際の補助となる機能を付加する。

ロボットから送られる画像には、光の当たっている明るい部分と、瓦礫などの隙間でできた暗い部分が混在している。明るい部分は暗い部分に比べ確認しやすいが、暗い部分は確認が困難である。しかし、その暗くなった瓦礫の隙間に要救助者が潜んでいる可能性がある。そこで、画面内に周囲に比べ暗い部分がある場合、その部分の明るさを変更することで、隙間の発見やその内部の確認を容易にする。

最初に、画像中から暗所を抽出する。PCで取得できる値は、RGBの輝度値である。式(4)を用いてその画素の明るさを表す明度「I」を計算する。このとき、もとのRGBの輝度値に逆変換するための色差 $C_1C_2C_3$ も同時に計算しておく

これにより明度画像を作成する。そして抽出したい暗所の明度を閾値とし、明度画像から閾値より大きい画素の明度を0にしてブラックアウトすると閾値以下の画素だけが抽出される。

$$I = 0.30R + 0.59G + 0.11B \quad (4)$$

$$C_1 = 0.70R - 0.59G - 0.11B \quad (5)$$

$$C_2 = -0.30R + 0.41G - 0.11B \quad (6)$$

$$C_3 = -0.30R - 0.59G + 0.89B \quad (7)$$

次に抽出された明度の最大値が表示できる明度の最大となるように明度 $I$ を変更する。その式を式(8)に示す。それぞれ $I$ は元の明度、 $I_{thr}$ は閾値、 $I_{max}$ は表示できる最大明度、 $I'$ は変更後の明度を示す。

$$I' = \frac{I}{I_{thr}} I_{max} \quad (8)$$

変更した明度を用い式(9)でRGBの輝度値に戻す。

$$\begin{aligned} R &= I' + C_1 \\ G &= I' + C_2 \\ B &= I' + C_3 \end{aligned} \quad (9)$$

ReBo.1から撮影した処理前の元画像をFig.13に示し、処理後の画像をFig.14に示す。元画像では確認できなかった暗所にある家具の足や、その下に倒れている要救助者の頭を確認することができる。これにより探索中の暗所の確認が容易になった。

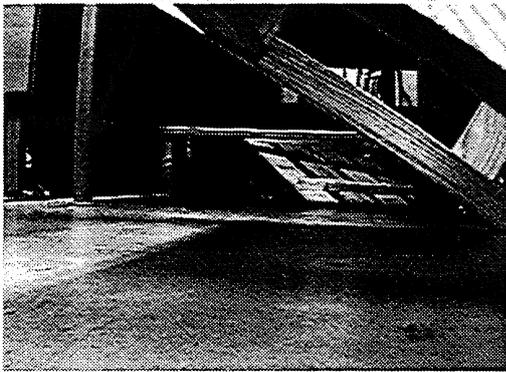


Fig.13: Original image



Fig.14: After processes

## 5. 結論

本研究では、探索型レスキューロボットAIT-ReBo.1の運動制御に寄与する“姿勢制御システム”として、3軸加速度センサを用いて重力加速度の方向を検出し、それに対するロボット軸との傾きを求めるシステムを構築した。これにより移動時に横転した際これを検知し、対応した運動制御を行うことで操作者の指示なく移動を継続することができた。

また、ロボットに搭載されたカメラ映像が移動時に揺られる問題を、ロボットの関節角度と同期を取って表示することで静止させた。そして横転した際に横向きになってしまうカメラ映像を姿勢制御システムからの情報を元に映像を回転させることで、操作者に提示する映像の水平を保った。これにより操作者に安定した映像を提示することができた。

さらに、要救助者探索の補助として画面内にある暗所を抽出し明度を変更することで、瓦礫内の隙間などの暗所を確認する際の補助機能を構築した。

これにより、AIT-ReBo.1のインテリジェント化を一步前進させることができた。

本研究は、平成17年度 愛知工業大学総合技術研究所プロジェクト研究として行った。

## 参考文献

- 1) 中内靖, “レスキュー工学とシステムインテグレーション” 巻頭言 計測自動制御学会論文集Vol.41, No12, 945/946(2005)
- 2) 平野慎也, 服部剛史, 羅志偉, 加藤厚生, “複雑な環境で活動する組み換え可能なレスキューロボットの研究開発” 第22回日本ロボット学会学術講演会予稿集, 3C21, Sep, 2003
- 3) 平野慎也, 羅志偉, 小田島正, 加藤厚生, “環境適応ロボットにおける分散型汎用コントローラの開発” 第21回日本ロボット学会学術講演会予稿集, 1B22, Sep, 2003
- 4) 平野慎也, 吉見圭司, 羅志偉, 加藤厚生, “イモムシ型探索ロボットの開発” 平成17年度東海支部連合大会講演予稿集 0-535
- 5) 藤 智史, “レスキューロボットに求められるもの 第3報: がれきの中から救助されて” 日本機械学会[No.96-2] ロボティクス・メカトロニクス講演会'96 講演論文集(Vol.A)['96.6.20~21, 宇部市]
- 6) LIONWINGS 社ホームページ:  
<http://www.lionwings.de/cms/side30.html>
- 7) 藤井宏行, “非熟練オペレータ用情報収集ロボット—サーモグラフィを用いた視覚支援システムの開発—” 計測自動制御学会論文集 第41巻 第12号 2005年12月
- 8) NEC 三栄ホームページ:  
<http://www.necsan-ei.co.jp/general/sinseihin/th9100pro/th9100pro.htm>

(受理 2006年5月2日)