

4. ロボットを利用した倒壊家屋周辺環境計測

奥川雅之・山本義幸

1. はじめに

阪神淡路大震災後、ロボット工学分野の研究者を中心に、ロボット技術の導入による効率的な救助活動支援の必要性が議論されるようになった。東海地方では、東北地方太平洋沖地震のような大規模地震の発生が予想されている。そこで、本研究では、防災キャンパス構想の一環として、大学にレスキューロボット隊を組織することを目的とした災害救助活動支援（災害対応）ロボットの開発を目指している。東日本大震災のような過去に発生した大震災におけるレスキューロボットの利用状況から、次のような問題点が挙げられる。

- ・ 現時点では、災害現場に教員や学生は入れない（ロボットの操縦や調整もできない）
- ・ 消防署にロボットを配備するのは経済的に難しい
- ・ 被災現場（倒壊家屋など）には、所有者の許可なく侵入し、捜索することができない
- ・ ロボットの支援内容には限界がある

そこで、これらの問題点に対する解決策として、ロボットの機能を限定し、安価で操縦が容易なロボットを開発し、大学で、レスキューロボットを所有し、管理運営することを検討している。ロボットの通常メンテナンスや地元の消防団員に対する操縦講習を大学で実施することができるだけでなく、訓練場所（別途準備が必要）の提供が可能となるとともに、学生消防団を結成することができれば、ロボットの利用範囲が広がるものとする。

また、企業防災の観点から、災害発生後の工場や事務所の被災状況調査への利用も検討する。さらに、搭載する計測機器を変更することにより、平常時における種々の検査用途利用も考えられる。

現在研究されているレスキューロボットは、遠隔操縦型で、小型カメラや各種測定器が搭載され、被害調査や人命探査を目的としている。特に、高難易度の不整地を走破するために、操縦者の操縦によってロボットの姿勢を制御することが可能な能動サブクローラ機構が採用されている [1]。しかし、能動サブクローラを有するロボットの制御には、操縦者の熟練を要するため、操縦者への負担が増加する。そのため、レスキューロボットの配備数が増加したとしても、操縦者の確保が問題となる。そこで、外力によって可動する受動サブクローラ機構を導入することにより、操縦者への負担を減らすことができると考えられる。本研究では、受動サブクローラを有し、遠隔操縦支援システムを導入することで、レスキューロボットの不整地走破性の向上および容易な操縦性の実現を図る。一方、倒壊家屋等の危険度を評価認定するために行われている被災状況調査に対して、ロボットの活用を検討する。現在の方法では、調査者の確保や実施時期の問題、不公平な評価方法等の問題があるため、定量的な危険度や損壊度の評価方法に関する文献調査を行い、ICT やロボット技術の可能性を考察する。

本年度の研究課題は、「容易な操縦性を有する移動機構及び操縦支援システムの開発」と「ロボットによるリモート環境計測の実現」とした。前者については、昨年度の問題点に対する改善内容、受動サブクローラの角度拘束条件の導出、転倒回避に対するワーニングシステムの構築について述べる。後者については、被災状況調査の定量評価について調査した結果を述べる。

2. 受動サブクローラを有するクローラ型移動ロボット Scott（スコット）

2.1 Scott の概要

図 1 に本研究で製作した Scott 1 の外観を示す。駆動用モータ (60W に変更) を内蔵するメインクローラを有し、前後にサブクローラを有している。サブクローラの各回転部は、受動性を有しているため、路面形状に応じて可動することができる。ただし、左右のサブクローラは独立に回転することはできない。電源は、LiFe バッテリー (23.1 V、2,300 mAh) を 2 本搭載している。制御部にはサンリツオートメーション社製 TPIP システムを

使用している。ロボットの本体寸法は、サブクローラを展開した状態では、全長 720 mm、幅 390 mm、高さ 100 mm であり、収納状態では、全長 370 mm、幅 390 mm、高さ 145 mm である。ロボットの本体重量は約 20 kg（搭載物を除く）、最大段差踏破高さは、230 mm である。

本年度は、測定用マイク及びカメラを先端に装備可能なロボットアームを製作し搭載した。今後は、図 2 に示す可燃性ガス（CH₄：メタン or HC：炭化水素）、酸素（O₂）、硫化水素（H₂S）、一酸化炭素（CO）の測定が可能なマルチガスセンサ（GX-2009、理研計器（株））の搭載および利用方法に関する見直しを行う予定である。



図 1 災害救助活動支援ロボット「Scott（スコット）」の外観



図 2 マルチガスセンサ（GX-2009、理研計器（株））

3. 受動サブクローラの角度拘束条件

3.1 受動サブクローラの角度拘束問題

能動サブクローラを有するロボットの場合、操縦者が各サブクローラを制御するため、操縦が複雑となり、操縦者側への負担が大きいのが欠点である。これに対して、受動サブクローラを有したロボットは、サブクローラが路面形状に沿って変化することにより、操縦者は進行方向の指示のみで段差踏破が可能である。

しかし、受動サブクローラの場合、その回転角度を拘束しないと、段差高さや段差形状によって、図 3 に示すような特異姿勢になることがあるため、サブクローラ部が本体上方側に倒れてしまう場合やサブクローラ自体が下方に入り込んでしまうことがあり、サブクローラ部の回転角度を復元することができなくなる。そのため、サブクローラの回転角度を拘束する必要がある点が課題となっていた。そこで、本年度は、サブクローラの角度拘束条件の導出を試みた [2]。



図3 特異姿勢の例

3.2 路面状況における拘束角度範囲の違い

Scott 1 の実証実験を実施する過程において、定性的な考察を試みた。単純段差において段差を上る際、前方サブクローラについては、段差との接地面を十分に得るために $90[\text{deg}]$ 以下の範囲内で上方方向に関する拘束角度を広く設定するとともに、段差を降りる際も、下方方向の拘束角度を広く設定しておくことにより、衝撃の少ない緩やかな踏破が可能となることが確認された。また、後方サブクローラについては、ロボットの重心を段差高さ以上に持ち上げる役割が必要と考え、上方方向に関する拘束角度は小さくし、踏破時の重心高さをより高くする必要がある。下方方向には、ロボットが段差上で倒れ込む際の衝撃を和らげる役割が必要と考え広い拘束角度の設定が有効である。

次に、階段踏破においては、一段目を上る際に必要な角度拘束範囲は同じ高さの単純段差と同じであると考えられる。しかし、階段を一段ずつ上っていく方法では時間がかかるため、階段段差間をロボットがまたぐことによって、斜面と同様に踏破していく方法が、踏破時間短縮につながる有効な踏破方法であることが確認された。そのため、階段踏破時は、前後サブクローラの拘束角度は小さくすればよい。

不規則な凹凸路面では、各関節の可動範囲を広くとることで凹凸のある路面で接地面積を確保する必要がある。このように路面の状況において様々な拘束範囲の組み合わせが考えられるため、サブクローラの拘束角度を固定値で設定することは困難である。

3.3 段差踏破条件の導出（単純段差）

単純段差に対して、受動サブクローラを有するクローラ型ロボットが踏破する場合、図4のように踏破していくことがシミュレーションや実験から確認されている。そこで、シーケンス毎に必要な条件を挙げ、それらを満たす条件式の導出を試みた。

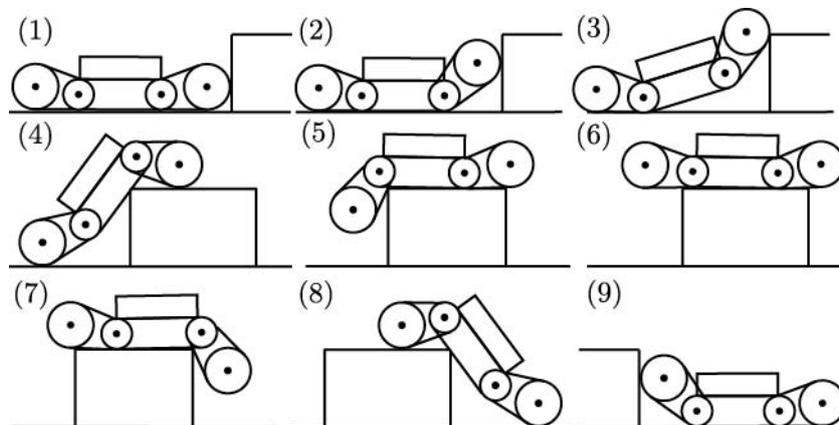


図4 単純段差踏破シーケンス

- (1) 垂直方向に力が発生する。
- (2) 前方サブクローラが壁面に押さえつける。前方サブクローラが上方向に回転する。
- (3) メインクローラの傾斜角が増大。
- (4) 重心高さが段差以上。回転中心よりも前方にある。
- (5) 前方サブクローラと段差上面の接地点が回転中心よりも前方にある。
- (6) ロボット全体が段差に上がる。
- (7) 前方サブクローラが最初に接触する。
- (8) 前方サブクローラと路面の接地点が回転中心よりも前方にある。
- (9) 後方サブクローラが最後に路面に接触する。

本年度は、シーケンス (1) から (5) までにに関する条件の導出を検討した。

(1) 垂直に力が発生する条件

サブクローラが段差垂直面に接触した際、接触側プーリー径が伝達側プーリー径より大きい場合、垂直方向に力が発生し、サブクローラが持ち上がる。

(2) 前方クローラが壁面に押さえつけ、前方サブクローラが上方向に回転する条件

サブクローラが段差垂直面（壁面）との接触点において、推進力とサブクローラの自重による力との差によって壁面からの反力がサブクローラに対して発生する。サブクローラが壁面を押す力が壁面からの反力よりも大きい場合、サブクローラと壁面との間に摩擦力を発生させることができる。さらに、前方サブクローラが壁面を上っていくには、推力によって生じる上方向の力が摩擦力よりも大きい必要がある。

(3) メインクローラの姿勢角が増大する条件

次に、メインクローラの姿勢角を増大させるためには、推力によって生じる上向きのモーメントが、ロボットの自重による下方向に働くモーメントより大きい必要がある。

(4) 重心位置が段差を超えるための条件

後方サブクローラの回転角度に応じて決まるロボット本体重心高さは、段差踏破における本体姿勢角の最大値となる際に、段差高さ以上である必要がある。

(5) 重心位置が回転中心より前にある条件

最後に、ロボットが段差上に上がるためには、シーケンス (4) から (5) に遷移する際に、本体重心の水平方向成分の位置が、後方サブクローラ回転中心位置よりも段差踏破方向になければならない。

以上の条件より、Scott 1 の場合、前方サブクローラの上方向に関する拘束角度範囲は、最小 28 度、最大 78 度となった。後方サブクローラの拘束角度範囲は、単純段差の場合は、拘束角度を 0 度とすれば良いことが確認された。

4. 転倒回避ワーニングシステム

能動サブクローラを有するロボットと違い、各サブクローラを任意に動かし転倒回避を行えないため、早期に転倒の危険性を予測する必要がある。しかし、ロボット搭載カメラ、センサ情報のみからでは転倒の危険性を予測することが難しい。

4.1 ワーニングシステムの概要

本研究では、安価で情報量の少ないセンサを用いて、ピッチおよびロール方向の転倒回避支援を行うことを目的とする。そのため、本研究では、傾斜角センサとポテンショメータのみを用いて、リアルタイムかつ継続的にピッチおよびロール方向に関するロボットの安定性を定量的に評価し、転倒の危険があると判断した場合に、警

告するとともにロボットの姿勢角情報や転倒回避のための行動プランを提案することで、オペレータの転倒回避支援を図る [3]。

4.2 安定性評価基準の検討

未知の不整地における移動ロボットの転倒する危険性を評価するために用いる安定性評価基準を検討した。移動ロボットの転倒安定性の評価基準は、これまでにいくつかの提案が行われている。それらの特性を比較し、クローラ型移動ロボットの不整地走行に最も適した評価基準を選定した。水平な路面でなくても評価ができ、転倒の際に生じる瞬間的な力の大きさや方向を扱うのではなく、外乱として働くエネルギーに注目し、完全に転倒するまでに供給しなければならないエネルギーの大きさによって安定性を評価しようとする「Energy Stability Margin」が適していると考えた。そのため、本研究では、Energy Stability Margin を自重で正規化した正規化エネルギー安定余裕 (NE 安定余裕) を用いる。

NE 安定余裕はロボットが接地軸周りに回転したとき、転倒する直前の重心高さとの差で求められる [4]。そのため、未知の不整地でもロボットの重心位置と地面とロボットとの接触点情報から求めることができる。現在の重心位置を内界センサであるポテンショメータとジャイロセンサによって取得可能なピッチおよびロール方向の本体傾斜角 (姿勢角) とメインクローラに対するフロントフリッパとリアフリッパの相対角度を用い、NE 安定余裕を算出する式を導出した。Scott 1 には、接地情報を計測するセンサを搭載していないため、今回は、各クローラの最下点が地面と接しているものと仮定した。

4.3 情報表示方法

オペレータに対して、選択経路が適切であると判断できる情報を表示するため、操縦画面にロボットの現在姿勢をグラフィカルに表示することを考えた。また、NE 安定余裕が閾値を下回ったら転倒の危険性があるとして、音声による警告とテキスト文による警報を画面中表示させ、背景色を青→黄→赤と変化させることで転倒の危険性をオペレータに提示することとした (図 5)。

4.4 閾値の検討

閾値に伴って警告が提示され、オペレータがその警告を認識し適切な行動を取ることで転倒回避が可能である必要がある。そのために、ロボットの安定余裕に関する変化量を利用し、転倒までの猶予時間 (予測転倒余裕時間) を算出し、その予測転倒余裕時間がオペレータの反応時間を下回らないよう警告を出す必要がある。

人間工学に基づき、情報伝達経路からオペレータが反応するまでの時間を反応時間とし、オペレータの行動がロボットに反映されるまでの時間を反映時間とする [5]。反応時間は、過去に行われた実験より 0.4 [秒] を用いた。また、反映時間は、システムが動作するまでの遅延を 0.1 [秒] と考えた。そのため、必要時間は 0.5 [秒] とした。また、反応すべき刺激の 0.3 ~ 0.5sec 前に予告信号を提示し、反応の準備を行うと反応時間が短くなることが知られているため、危険域の 0.5[s] 前に注意域を設けた。

操縦画面に表示されているロボット搭載カメラの映像では、転倒し始め転倒が回避できない状態になるまで判断ができないが、ワーニングシステムにより、ロボットの姿勢情報と注意域で画面が遷移し警告文がでて。また、警告域で画面が遷移し、警告音および警告文が表示された。現在の姿勢からどのような行動をとれば転倒を回避することができるかの判断が可能である。これらのことから、システムの有効性とシステムが正しく機能していることが確認できた。

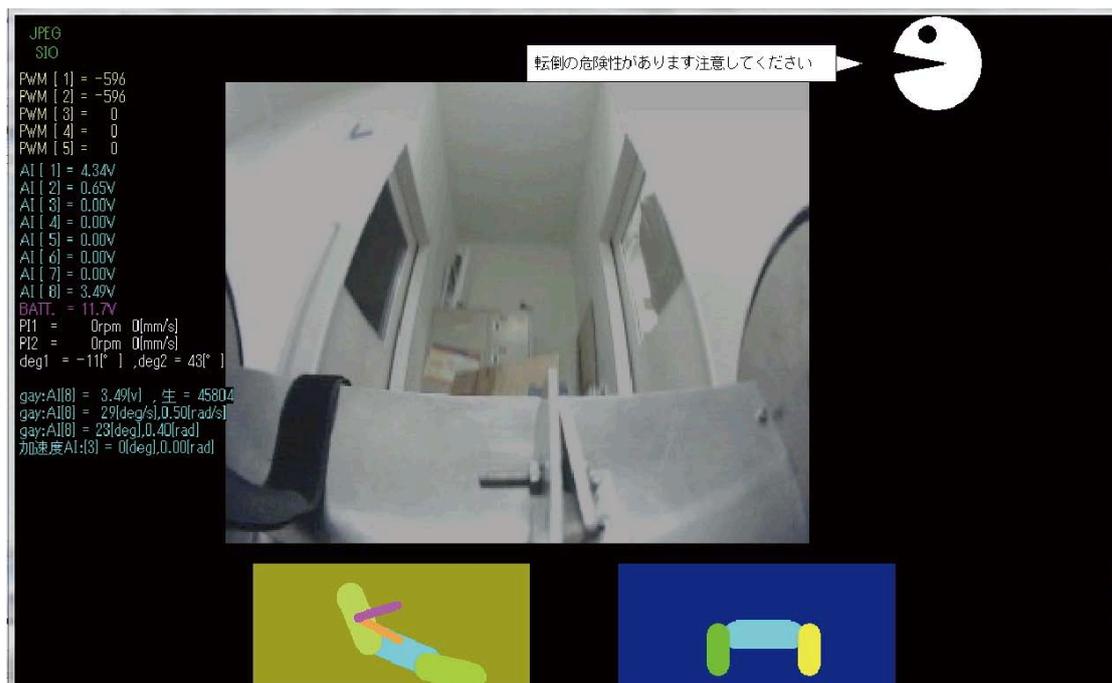


図5 操縦支援システム（ワーニングシステム）の表示画面

5. 被災状況調査の定量評価について

5.1 被災建物の危険度判定と被害認定

震災後、避難所で生活する被災者の多くは、避難所生活から解放されたいであろうし、製造業の多くは、すぐに生産を再開したいため、製造業の経営者は、損壊した生産設備の補修や復旧を速やかに行いたい。しかし、地震が起きた後の建物に立ち入り、損壊した生産設備に不用意に近づくことは危険である。余震の発生、生産設備の損壊や漏電、建造物や配管の崩落といった2次災害の危険性が高いためである。災害発生後、被災した建物の状態を調査するものとして、応急危険度判定と建物被害認定調査がある [6]。

「応急危険度判定」とは、地震後、余震等による建築物の倒壊や落下物、転倒物による二次災害を防止するため、できる限り早く、短時間で建築物の被災状況を調査し、当面の使用の可否について判定するものである。主に、応急危険度判定士として都道府県に登録された耐震診断士や建築士などが、ボランティア活動として行っている。そのため、判定作業は、ボランティアの人材確保、余震の収束を待ち、発災後、しばらく経ってから行われる。調査結果は、危険（赤紙）、要注意（黄紙）、調査済（緑紙）で表示される。

一方、「災害に係る住家の被害認定」とは、地震や風水害等の災害により被災した住家の被害程度（全壊、半壊等）を認定することをいい、自治体によって実施されているものである。この被害認定により、災害の規模、被害の全体像把握とともに、被災者に対する「り災証明書」の発行を行うこととなる。

他にも被災度区分判定というものもある。地震により被災した建築物を対象に、その建築物の内部に立ち入り、建築物の傾斜、沈下及び構造躯体の損傷状況等を調査することにより、その被災度を区分するとともに、継続使用のための復旧の要否を判定するものである。

工場建屋等の危険度判定や被害認定の調査を行う人手不足や作業の効率化等が課題となっている。

5.2 被災状況調査の定量化に関する動向

災害によって発生した建物被害の認定は、罹災証明書の発行により行われる。そのため、建物の被災度を判定する建物被害認定調査が自治体により行われている。一次調査として外観の目視調査による被災度の判定を行い、その結果をもとに罹災証明書が発行されている。不服がある場合は、内観を加えた目視調査を再度行う2段階調

査方式をとっている。被害が認められる部位の面積比によって点数化されている。しかし、公平性や運営方法等が問題とされている [7、8]。これらの問題に対して、富士常葉大学の田中らは、カメラ画像の画像処理を自動化した自己診断システムの提案等を行い被害度の定量化に関する研究を行っている。また、東京大学の藤生らは、調査現場でリアルタイムに撮影した画像をサーバーにアップロードし、それらの写真を判定員が建物被害認定を行う遠隔被害判定システムを提案している [9]。これらを有機的に組み合わせることにより、被害認定の定量的な実行が可能になるものとする。

6. まとめ

本研究では、防災キャンパス構想の一環として、容易な操縦性の実現を目指した受動サブクローラを有するクローラ型移動ロボット Scott に対する受動サブクローラ角度拘束条件の導出、転倒回避に関するワーニングシステムの構築、被災状況調査に関する研究動向調査を行った。今後は、被災状況調査の実態を調査し、ロボット技術の適用について考察する予定である。

参考文献

- [1] 小柳, 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, pp. 15-18, 2010.
- [2] 鈴木, 長谷川, 奥川, 受動サブクローラを持つクローラ型ロボットの角度拘束条件の検討, SI2012 論文集 DVD-ROM, pp. 671-676, 2012.
- [3] 長谷川, 鈴木, 奥川, 受動サブクローラを有するレスキューロボットに対する遠隔操縦支援システムの検討, SI2012 論文集 DVD-ROM, pp. 2415-2420, 2012.
- [4] 米田, 広瀬, 歩行機械の転倒安定性, 日本ロボット学会誌, Vol.14, No.4, pp. 517-522, 1996.
- [5] 溝口, 他 6 名, ヒューマノイドロボットと人間とのインタラクションにおける人間計測システムの開発 - 小型姿勢センサモジュールを用いた上半身運動計測システム -, 日本ロボット学会第 25 回学術講演会予稿集, Paper No. 2012, 2007.
- [6] 内閣府, 災害に係る住家の被害認定, <http://www.bousai.go.jp/hou/unyou.html> (2012/7/20 アクセス)
- [7] 重川, 田中, 堀江, 林, 新潟県中越地震における建物被害認定調査の現状と課題, 地域安全学会論文集, No. 7, 133-140, 2005
- [8] 吉富, 他 9 名, 災害対応業務の効率化を目指したり災証明書発行支援システムの開発: 新潟県中越地震災害を事例とした新しい被災者台帳データベース構築の提案, 地域安全学会論文集, No. 7, pp. 141-150, 2005.
- [9] 藤生, 大規模地震災害時における建物被害認定の遠隔判定システムの設計, 東京大学大学院情報学環紀要 情報学研究, No.81, pp. 71-85, 2011.