プラント等災害時における救助支援ロボット群の開発 —ステレオビジョンによるトレース追従移動方法の検討—

Development of rescue supporting robots team against plant accident - Study on trace following method with stereo vision camera-

○正 天野 久徳 (消防研) 正 大須賀 公一 (神戸大)
正 岩野 優樹 (明石高専)

Hisanori AMANO, National Research Institute of Fire and Disaster, amano@fri.go.jp
Koichi OSUKA, Kobe University, osuka@mech.kobe-u.ac.jp
Yuki IWANO, Akashi National College of Technology, iwano@akashi.ac.jp

A chemical plant accident is serious, because there are many kinds of and much strong acid, toxicant, explosive, hazardous material in the field. Hazmat team member who is chemical accident experts of fire department, have to put much equipment on to prepare the chemical when they get into the site. So, their activity is very hard, because the equipment is heavy. Moreover, they have to walk long distance, because the frontline base should be set far away to avoid the damage by the chemical. Then, we are planning to develop supporting mobile robots team for the hazmat member. An example is equipment carrying robots team that follows a member automatically. Now we examined the following system, as first step for the robots team development, and developed a first stage robot based on FRIGO-R that is the crawler robot unit, we developed, for general purpose research works.

Key Words: Disaster Response Robotics, Multi Robotics, Visual Sensing, Trajectory Planning

1. はじめに

化学プラントにおいて事故、災害が発生した場合を想定すると、種々の劇物、毒物、危険物など各種化学物質が存在するため、救助活動に種々の資機材が必要となる。また、各種化学物質の漏洩危険性があるため、管理区域を広く設ける必要があり、安全環境に設置される対策本部は、他の災害と比較して災害現場から遠い場所に設置せざるを得ない。したがって、現場への資材搬送には多くの物資を長距離搬送しなければならない。これらの作業は、種々の化学薬剤に対処できる装備をつけた救助隊員にとって大きな負担である。さらに、空気呼吸の容量などから、活動時間に制限があり、往復に時間がかかることにより、実質の作業時間が短くなってしまう。

そこで、化学プラントなどの災害環境下において、救助活動を支援するロボットシステムの開発を試みる。ロボットシステムによる救助活動の支援活動は種々考えられるが、ここではまず、救助資機材の搬送について考える。また、開発するロボットシステムは、複数の小型移動ロボットで構成することとした。本稿では、開発するシステムのコンセプトとシステムを構成するロボットの概要を紹介し、開発への第一段階として、相対位置認識に関する基礎的な検証について報告する。

2. 開発コンセプト

既に著者らは、小型ロボット群は災害ロボットとして有効な形態の一つであると指摘している^[1, 2]。そこで、本開発においても、小型の移動ロボット群によってシステムを構成することとした。

プラント等災害時における救助支援ロボットシステムのコンセプトの一部をFig.1に示す。化学防護服を着た救助隊員に、画像認識用のマーカーを着け、画像認識によって救助活動支援ロボットは救助隊員に追従して移動する。このとき、救助活動に必要な資機材を、本ロボットシステムで搬送する。ロ

Fig.1 Conceptual illustration of rescue supporting robots team

Fig.2 Following system with visual sensing as first step

ボットシステムが搬送することによって、救助隊員の肉体的負担が軽減でき、救助隊員にシステムが自律的に追従移動するため、操縦の必要が無く、救助隊員への負担が小さいと言える。

ここで提案システムを実現するためには種々の要素技術の開発が必要であると考えられるが、本稿では、まずその第一段階として、Fig.2 に示すように、ロボットが自律的に救助隊委員に追従して移動する技術について検討を進める。

著者らは、核燃料加工施設などにおける災害を想定し、自力避難が不可能な被災者を被ばくから保護するため、複数の小型ロボット群による防護壁ロボットシステム、および、けん引ロボットシステムを開発した^[3,4]。防護壁、けん引の両システムにおいて、ロボット間の画像認識による追従移動を実現した。

画像認識用のターゲットとして、Fig.3 に示す自光式の球体を開発し、用いた。直径 50[mm]、乳白色の球体中心に LED を放射状に配し、発光させている。LED の光は指向性が強いが、乳白色の球体に光を通過させることにより、色が均質となるようにしている。Fig.3 には赤色のターゲットを示しているが、この他に白、青、オレンジ、緑、計 5 色のターゲットを製作している。ターゲットは同じ物を使用することとした。ただし、先行研究では、ロボット間の追従を行ったため、当然、非追従者も追従者も移動機構は同じロボットとしている。そのため、どちらも移動能力に差異がないため、比較的追従を実現しやすい。この研究においては非追従者上にターゲットを一つ設置していたが、今回は、人に追従するため、追従移動を実現するためにより多くの情報が必要と予想される。そこで、非追従者となる人には、ターゲットを 2 個装着させ、向きも認識できるようにした。

視覚認識には、41 万画素の 1/4inch CCD カメラと画像解析用のハードウェアを使用した。ターゲットとの相対位置のうち、左右方向のズレは比較的正確に認識することができたが、距離についてはターゲットの視覚上の大きさだけで同定を試みたため、十分な精度を得ることは難しかった。そこで、今回は視覚認識にはステレオカメラを用いることとした。

3. ロボットの概要

使用したロボットの概観を Fig.4、概略仕様を Table 1 に示す。ベースには消防研究センターが研究開発用に開発した FRIGO-R を利用している^[5,6]。FRIGO-R はクローラを用いた移動機構に、PCI バスの PC/AT 互換のボードコンピュータを積載した物である。Fig.4 中、右側が前方であり、クローラは後ろ側のスプロケットで駆動される。Fig.4 に示している、クローラ移動機構上部に取り付けられている黒いケース内に、コンピュータが搭載されている。コンピュータケース上に出ている白い棒状の物が USB 用の無線 LAN アダプタである。コンピュータの前方に取り付けられている金色の物体が、画像認識用のステレオカメラである。ステレオカメラを水平に設置すると、画像追従用のターゲットを人間の足に取り付けようと、その視野内には入らなくなってしまう。足にターゲットを取り付けた場合、歩行による動作が大きいため、ロボットが追従するための起動生成が難しくなることが予想される。そこで、Fig.2 に示したように、人間の上半身にターゲットを設置することとしている。そのため、上半身のターゲットをカメラの視界中心でとらえられるよう、ステレオカメラは上方へ $\pi/4$ [rad] 傾けて取り付けられている。

積載しているコンピュータの概要を Table 2 に示す。コンピュータおよびインターフェイスは、FRIGO-R 用に開発した、両面からボードをさすことができる PCI バックプレーンボードを利用している。3 つあるスロットうち、1 つはメインボ

Fig.3 LED target for visual sensing

Fig.4 Overview of following robot based on FRIGO-R

Table 1 Specification of following robot

Dimensions	375(L) x 320(W) x 195(H) ^{*)} [mm] *)Excepting camera and LAN antenna Camera is 230[mm] in height. LAN antenna is 255[mm] in height.
Mass	12.8[kg]
Crawler width	94[mm]
Motor	27.5[W] x 2, Reduce ratio 42:1
Battery	Lithium-Ion, 28.4[Wh] x 4
Stereo camera	Base length 120[mm] 1/3inch CCD x 2 8Bit Color, XGA, 30frames/s (max.) Focus length of lens 4[mm] Interface IEEE1394

Table 2 Specification of Computer

Back plane board	Both side PCI bus; 3 slots Front side 1 slot for CPU board Back side 2 slots for various boards
CPU board	PC/AT compatible
Main CPU	Pentium-M 1.6[GHz]
Data bus	PCI
Display	VGA
Keyboard, mouse	PS2 / USB
Network	IEEE 802.11b on board / via USB
Main memory	1[GB]
Disk storage	Solid disk; 2[GB]
Operation system	LINUX Kernel 2.4.22
Network	UDP/IP
1st slot	Interfaces board for robot
DIO	DIO; 32bit, AD; 8ch, 12bit, DA; 8ch 12bit Encoder counter; 8ch, 24bit
2nd slot	Interfaces board for stereo camera IEEE 1394 x 4

ード用、一つはロボット移動制御等に必要となるインターフェイスボードに使用する。

今回使用したステレオカメラは、IEEE1394 インターフェイスとなっているが、IEEE1394 インターフェイスを搭載した、適当な PCI バスボードコンピュータが入手困難であった。そのため、残りのスロットは、ステレオカメラのインターフェイス用として、IEEE1396 ボードを挿入している。

画像処理などは、ハードウェアで処理することも効率が良いと言われているが、今回用いたステレオカメラの画像解析用のハードウェアが開発されていなかった。そのため、ソフトウェアで解析することとした。ステレオカメラ専用の解析のソフトウェアは、Windows のみの対応であった。FRIGO-R では、Linux を OS として採用したコンピュータによる制御の実績がほとんどである。そのため、Windows 用の画像解析ソフトウェアを Linux 用に改造して使用している。しかしながら、ソフトウェアで解析するために、コンピュータにかかる負荷が大きい。そのため、先行研究で利用した FRIGO-R で使用した CPU ボードでは処理能力が不足であった。そこで、より、処理能力の高い CPU 積載のボードへ変更している。このコンピュータボードを利用することによって、ステレオカメラから得られた情報の処理は 7[Hz]で行うことができることが確認されている。

4. トレース追従のアルゴリズム

救助活動に利用することを想定しているの、災害現場での稼働を想定している。災害時には、平時と異なり障害物が散乱していることも十分予想される。このような場合、先行する者は比較的踏破しやすい経路を選んで進む。したがって、ロボットが追従移動する際、ロボットや人など、追従する対象の移動経路と同じ経路を追従する方法が適している。すなわち先行者の移動軌跡をトレースするように追従移動することが適している。

ここで、先行する救助隊員と、追従するロボットの関係を Fig.5 に示す。図中、隊員とロボットは形を省略している。先行する救助隊員の移動軌跡軌跡を図中に実線で示している。通常の、逐次的な相対位置認識のみを用いて子機が親機に追従すると、図中に波線で示したように、直線的に最短距離で移動する経路を選択することになる。したがって、先行する人の移動経路と異なった経路を子機は進むことになってしまい、災害状況に上手く適応できなくなってしまう恐れがある。そこで、トレース追従移動するために、ロボットの軌道を生成する方法を検討する必要がある。

トレース移動に関する軌道生成法は、まず第一段階として、先行研究とほぼ同じ方法を採用してみる^[7]。軌道生成法の概略を Fig.6 に示す。ここではまず例として連続する 5 回の相対位置サンプリング時点における救助隊員と子機の位置関係を示している。救助隊員の位置を P で追従するロボットの位置を C として示している。それぞれの添え字がサンプリング時点の番号を示している。最初のサンプリングを 0 とした。サンプリング時点 1 において隊員の位置は P_1 、ロボットの位置は C_1 と表示される。子機は C_1 から順に C_2, C_3, C_4 と移動した状態である。現時点はサンプリング時点 4 であるとする。ただし、図の煩雑さをさけるために隊員の位置は×印で示している。

ロボット各サンプリング時点において、隊員の相対位置を計測する。たとえば時点 1 においてはロボットに固定されて

Fig.5 Following method of mobile robot

Fig.6 Creating method of following tracking trajectory

いる O_1 座標系で位置 P_1 を計測する。また、子機はサンプリング時点間の移動量を計測する。たとえば、サンプリング時点 4 において、 O_3 からみた C_4 の位置および O_4 の向きを、オドメトリイによって計測する。Fig.4 に示したようなクローラ移動機構は、移動する際にクローラが滑るので、厳密にはオドメトリイは成立しないが、ここで求められる精度では、有効と考える。以上の方法で親機の相対位置計測と子機自身の移動量を計測することにより、各サンプリング時点における子機に固定されている座標系で親機の位置を知ることができる。

計測データを基に、各サンプリング時点において追従移動のための目標軌道を生成する。後述するが、まずここではサンプリング時点 0 を基準として軌道生成手順を説明する。

- ステップ 1) サンプリング時点 4 で各データが求められる。
- ステップ 2) 基準となるサンプリング時点 0 の子機上に固定されている座標系を用い親機の各位置を求める。
- ステップ 3) 親機の現時点位置 P_4 と P_1 を結び、 P_4 と P_3 にそれぞれ垂線 l_4 と l_3 を引く。子機の現時点位置

C_4 が二つの直線間に存在するか否かを調べる。

ステップ4) ステップ3同様に、サンプリング時点の一つさかのぼり、親機の位置 P_3 と P_2 を結び、 P_2 に垂線 l_2 引く。子機の現時点位置 C_4 が二つの直線間に存在するか否かを調べる。

ステップ5) ステップ4を繰り返し子機の現時点位置 C_4 が二つの直線間に存在するまで繰り返す。Fig.6ではサンプリング時点1までさかのぼったときに C_4 が2直線で囲まれる領域に入るようになる。

ステップ6) サンプリング時点1で領域内に入ったので、折れ線 $P_4P_3P_2P_1$ を目標追従軌道とし、基準座標系をサンプリング時点1の子機上に固定された座標系としてステップ1に戻り、次のサンプリングを行う。

追従軌道は観測時刻毎に再計算され更新される必要がある。しかしながら、誤差が積算されることなく、また、全ての軌道生成時点において計算時間や必要とされる記憶領域の変化は小さい。

5. 相対位置認識

先行研究で使用した CCD カメラを用いて画像認識し、相対位置の同定を行った場合と、ステレオカメラを利用した場合の誤差について相対位置認識の精度について検討を行った。相対位置は、水平方向の位置と距離の二つの情報によって推定している。まず距離について検討した。

先行研究では41万画素の CCD カメラを使用したため、0.5m離れた地点で、直径50[mm]のターゲットの位置を観測した場合、理論的には、画面中心付近で、画像1[pixel]が距離10[mm]に対応する。すなわち、理論上の距離分解能は10[mm]となる。実際に距離同定実験を行うと、平均で、87[mm]、最大で、165[mm]の誤差が観測された。光の外乱によって、数～十数ピクセルの観測誤差が発生していると推測される。一方、今回製作したロボットで実験を行うと、水平距離で1[m]の状態で、距離に関する計測誤差は平均で、5.8[mm]、最大で、12.6[mm]となった。距離に関しては、誤差が1/10以下になったことが確認された。

水平方向の位置精度については実験を行っていない。しかしながら、先行研究においても水平方向については、1[pixel]あたり1[mm]に対応しており、距離に対して、10倍の精度があり、計測精度は十分であった。一方、今回使用しているステレオカメラは78万画素以上あるため、問題ないと推測される。ただし、先行研究で使用したカメラは、レンズ交換可能であり、視野角を変更することが可能であった。しかし、現在使用しているステレオカメラは、比較的広角レンズのものを採用しているが、CCD カメラのようにレンズ交換はできなく、視野角を選択することができないという問題点はある。

6. おわりに

開発を行ったクローラ移動ユニット FRIGO-R 基に、ステレオカメラを使用し、画像認識による自律追従型ロボットを製作した。相対位置認識の基礎的実験を行い、先行研究で行ってきた、CCD カメラによる画像認識法と比較して、距離精度が向上し、追従移動のための起動生成に、十分な精度がある

ことが確認された。

本稿内では、移動に関係しない人間の無駄動作は考慮されていない。本稿で人間は移動活動しか行わないとの仮定で検討を進めた。しかしながら、実際の人の動きには、歩行と関係ない無駄な動きもあるため、何らかのフィルタリングにより、無駄動作を除去する方法の検討も必要である。また、先行者がロボットである場合、その移動量は、モータの回転角などからある程度推定できる。この値を追従者に伝達することにより、通路を曲がった時など、画像認識用のカメラの視界から外れてしまった時でもある程度の位置の予測は可能である。しかし、人間の移動の場合、容易にこのようなデータを得ることが難しい。この2点が当面の研究課題であるといえる。

文献

- [1] Amano, H., "Development Concept of Rescue Robot Against Nuclear Plant Accidents", Proceedings of the ICASA/SICE Workshop -Intelligent Control System -, pp.185-190, 2002.
- [2] 天野久徳, "消防防災ロボットの配備促進への一提案", 消防研究所報告, No.100, pp.265-270, 2006.
- [3] Amano, H., Osuka, K. Iwano, Y., "Development of Robotic Wall System to Protect Victims", Proceedings of 2005 INTERNATIONAL CONFERENCE ON ADVANCED ROBOTICS, pp.579-586, 2005.
- [4] 岩野優樹, 大須賀公一, 天野久徳, "原子力施設災害における救助活動用担架構成ロボットの開発", 日本ロボット学会誌, Vol. 24, No. 3, pp.80-86, 2006.
- [5] 天野久徳: 移動ロボットベース "FRIGO(フライゴ)" シリーズの開発, 消防研究所報告, No.100, pp.111-117, 2006.
- [6] Amano, H., "DEVELOPMENT AND APPLICATIONS OF BASIC UNIT OF TRACK MOBILE ROBOTIC SYSTEMS OF "FRIGO" SERIES", Proceedings of the Fourth IASTED International Conference CIRCUITS, SIGNALS AND SYSTEMS, pp.358-367, 2006.
- [7] Amano, H., Osuka, K. Iwano, Y., "DEVELOPMENT OF MOBILE SAMLLROBOTS GROUP FOR RESCUE ADAINST PLANT ACCIDENTS -BASIC STUDY ON MOVEMENT TO THE SITE-", Proceedings of 7th International Conference on Motion and Vibration Control, 2004.