解説

レスキューロボットの遠隔操縦支援技術

Remote Control Support Technologies for Rescue Robots

大野 和 則^{*1} 城 間 直 司^{*2} ^{*1}東北大学 ^{*2}茨城大学

Kazunori Ohno^{*1} and Naoji Shiroma^{*2} ^{*1}Tohoku University ^{*2}Ibaraki University

1. 遠隔操縦支援技術

レスキューロボットの分野では、二次災害の危険のない、安全な遠隔地からロボットを操縦して、災害現場を探索するロボットの開発が進んでいる。このような遠隔操縦ロボットは、操縦者が安全である一方、遠隔地からロボットを適切に操縦することは非常に困難であり、確実に操縦が行える支援技術の開発が望まれている。

本稿では、レスキューロボットの遠隔操縦を支援するロボット技術として、著者らが開発している、1. 俯瞰視点でロボットを操縦する俯瞰視点操縦インタフェース（2章）と、2. 簡単な操縦で多自由度のロボットを操縦する半自律操縦支援システム（3章）に関して説明する。前者の技術は、ロボットに搭載したカメラの映像ではロボットや周辺の状況の把握が困難な場合や、ロボットと操縦卓の間の通信量に制約があり多くの情報を伝えられない場合の解決策になっている。後者の技術は、足場の悪い被災地を探索するロボットの多自由度の走行機構を適切に操縦するのが困難な場合の解決策になっている。レスキューの現場は時々刻々と変化する。状況の変化に対応できるよう、これらの手法はその場で計測したセンサ情報を用いて行うのが特徴である。文面の都合上、大まかな紹介となるが詳細が調べられるように参考文献も合わせて掲載する。

2. 俯瞰視点操縦インタフェース

2.1 概要

通常の遠隔操縦は、遠隔地にいる操縦者がロボットの搭載カメラ（一人称）視点画像を用いて移動体を操縦する形態である。そのようなシステム構成による遠隔操縦は、操縦感が非常に悪いことが知られている。これは、カメラ画像の情報のみからでは、移動体自身および移動体と周囲環

図1 Overview of bird's-eye view synthesis

境との関係を把握することが難しいのが原因の一つである。環境と移動体自身が同時に映った俯瞰（三人称）視点画像を遠隔操縦に用いることによりこの遠隔操縦の問題を克服し、遠隔操縦性の向上を図るのが本手法のねらいである。過去に撮影したカメラ映像を用いて俯瞰視点画像を合成する方法を2.2節で、三次元レーザ距離計で計測した地形を用いて俯瞰映像を合成する方法を2.3節で紹介する。

2.2 過去画像履歴を用いた俯瞰視点シーン複合による遠隔操縦

俯瞰（三人称）視点画像は、新たな付加カメラによっても実現可能であるが[1][2]、ここでは、新たな付加カメラを使用せずに、過去にカメラにより撮像した画像履歴を用いてその実現を図る[3]。

端的に言うとも過去の視点位置から見たシーン画像をもとに、現在の移動体をその視点位置から見たシーンの複合画像を生成し、その画像を移動体の操縦者に提示して遠隔操縦に用いる。生成複合俯瞰画像は、ロボットの遠隔操縦において重要な要素である、ロボットの状態およびその周囲環境の様子をグラフィカルに端的に表したものとなっている。図1は、俯瞰的複合画像生成法の概念を示したものである。図1の左上の画像は、移動体搭載カメラからの現在の画像、図1の上側の真ん中の画像は、移動体の現在の位置・姿勢情報である。これらのカメラ画像とそれに対応するカメラの位置・姿勢情報は画像履歴として保存される。図1の右上の画像は、過去画像履歴より選択された移動体を

原稿受付 2009年12月15日

キーワード: Rescue Robot, Remote Control Support, Bird's-eye View, Semi-autonomous

^{*1}〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-01

^{*2}〒316-8511 日立市中成沢町 4-12-1

^{*1}Aoba-ku, Sendai-shi, Miyagi

^{*2}Hitachi-shi, Ibaraki

俯瞰的に見る視点からの背景画像である。これらの情報と予め生成されている移動体 CG モデルより図 1 の下側の画像のような、環境中の移動体を俯瞰的に見た複合画像を生成する。

図 2 は、本手法を用いて移動体の遠隔操縦を行った実現例のスナップショットである。本手法では、俯瞰視点位置の選択方法も重要な要素である。一定距離背後の視点、一定時間遅れの視点、視野範囲内に移動体を常に捉える視点など様々な視点選択方法が存在する。例の複合画像の視点位置は、表示されるロボットモデルが画像中央にできるだけ近くなるよう自動的に選択されている。また、移動体位置・姿勢は、搭載レーザセンサを用いたスキャンマッチングにより得ている。この実験風景の各図は、左から右、そして、上から下へと時間が進んでいく。図 2 より、本手法を用いることで遠隔地の環境内にあるロボットの状態およびロボット周囲の環境の様子を容易に把握することが可能となる。よって、本手法により、移動体の遠隔操縦性の向上を図ることが可能となる。

移動ロボット研究において、移動体の位置・姿勢推定は、難しい問題の一つである。本手法には、ある程度正確な移動体の位置・姿勢推定手法が必要となるが、本手法は、通信容量の低い通信状況においても適用可能であり、データ容量の大きい画像を頻繁に伝送する必要がなく、また、環境モデルを構築しないイメージベーストの画像生成であるため、複合画像生成におけるリアルタイム性が高い。したがって、擬似実時間という意味で変化の緩やかな動的な環境への対応が可能であるといった利点がある。また、移動体をワイヤフレーム表現することにより移動体自身を透かしてその先の光景を確認することができ、遠隔操縦における死角の低減化が可能である。さらに、実画像にノイズが入っていたとしても、ノイズの少ない過去の画像を背景画像として選択することでノイズによる画像の乱れの影響を減らすことができる。また、離散的な過去画像を選択し背景画像として用いているため、実動画像をそのまま提示する場合に比べ高周波の振動をフィルタリングする効果がある。俯瞰的・客観的に環境中の移動体を観察できる視点からの振動の少ない画像を提示することにより操縦者のカメラ酔いや方向感覚喪失の低減等を図ることが可能である。本手法は、ロボットの遠隔操縦のみならず、あらゆる移動体の操縦へ適用可能な技術である。

2.3 三次元地形とロボットモデルを用いた俯瞰視点シーン複合による遠隔操縦

本手法の特徴は、小型の三次元レーザ距離計で計測したロボットの全周囲の地形点群とロボットワイヤフレームモデルを用いて俯瞰視点を合成する点である。レーザを用いることで、輝度の変化が大きくカメラ映像から周囲の認識が困難な場合や、暗闇でも周辺の状況を確認できる。また、

図 2 Teleoperation with the synthesized bird's-eye view

図 3 Model of 3-D bird's eye view control interface

マウスを用いて自由に視点を切り替えることが可能である。狭い場所を通り抜ける場合も視点を換えることで、対象物までの距離を正確に把握して通り抜けることができる。

図 3 に三次元操縦インタフェースのモデルを示す。提案手法では、ロボットに搭載可能な小型三次元レーザスキャナ (TK Scanner [5]) を用いてロボットの全周囲の三次元形状 S を点群として計測する。得られた点群上に、ロボットワイヤフレームモデル M_{Kenaf} をロボットの移動量 $P_t = (x, y, z, \theta_{roll}, \theta_{pitch}, \theta_{yaw})$ とサブクロウラの角度 $\theta_{subcrawlers}$ に合わせて描画することで俯瞰視点を合成する。ロボットの移動中の位置・姿勢はジャイロベースドオドメトリを用いて行った。メインクロウラで接地したことを前提としてオドメトリ、ジャイロ、加速度センサを用いて位置を推定する [6]。マウスを用いてカメラ C の位置・姿勢を変更することで、能動的に視点を切り替える。

図 4 に廊下で逐次三次元形状を計測し、三次元操縦インタフェースを用いて障害物をよけながら探索を行う様子を示す。最初の計測で廊下の外形、左側にある箱の手前の側面、右側にあるパイプ椅子のおおよその外形を計測した。箱とパイプ椅子をよけながら廊下を進むことができた。2 回目の計測では、左側の箱の側面と右側のパイプ椅子の詳細形状を確認し、ぶつからないようロボットを操縦した。最後、3 回目の計測で死角になっていた部分の形状をはかることで、三次元の形状を計測しつつ安全に狭い通路を通り抜けることができた。三次元の形状を送るには通信量が必

図4 Obstacle avoidance using 3-D bird's-eye view control interface: During obstacle avoidance, three 3-D scan data were measured

図5 Tube maze test field: (A) field photo, (B) sunlight condition in daytime, (C) and (D) 3-D map constructed by the Kenaf during the exploration

要となるが、ロボットの移動中はロボットの位置・姿勢、サブクローラの角度の情報だけを送るだけで俯瞰視点を合成することができる。よって、レスキューロボットでよく使われる ad-hoc 通信などの通信帯域が狭い場合でも安定して操縦を行うことができる。

提案手法の有効性を評価するため、2008年11月17日～21日の間、アメリカの National Institute of Standards and Technology (NIST) がアメリカのテキサス州にある Disaster City で開催したレスキューロボットの能力を評価するイベントに参加した [7]。Disaster City 内の Tube maze test field は、上りと下りの坂を交互につなぎ合わせた床の所々に円柱のポールが立てられている。ロボットはポールの間の隙間を抜けながら探索を行う (図5A)。天井があるものの隙間から強烈な太陽光が入ってくるため、図5Bに示すように明るいところと暗いところの輝度差が非常に大きい。遠隔操縦の際、カメラの映像で床面の凹凸やポールの存在を確認することが困難であった。図5C、Dに計測した三次元形状をオンラインでつなぎ合わせて構築した周辺環境の点群を示す。床面から垂直に上に伸びてい

るのがポールである。三次元操縦インタフェースを用いることで、周囲のポールとロボットの位置関係を把握しながら、ロボットの進行方向を決め探索を行うことができた [8]。また、次章で説明する半自律操縦支援システムを用いることで、地面の凹凸を気にせずに探索に集中できた。

3. 半自律操縦支援システム

3.1 関連研究

不整地を移動するロボットは複数のクローラや車輪を有しており、遠隔地からそれらを適切に操縦し、段差の踏破や狭い場所の通り抜けを行うことは困難である。この問題を解決するため、簡単な操縦でロボットに段差などを踏破させる研究が、近年国内外で増えてきた [9]～[11]。クローラロボットの自律／半自律の不整地踏破研究の特徴は、従来の対向二輪やローバなどと異なり、ロボットを点ではなく多面体で近似して走行可能性を判定することである。また、段差や階段などを踏破する際、クローラ変形も含めた多点での接地を考慮して動作を生成する研究が主流である。著者らの手法の特徴は、不安定な地面の上を段差を確かめながら踏破し、踏破中に地形が変化しても即座に対応できる点である。

3.2 半自律操縦支援システム概要

提案手法は、操縦者が進行方向を入力するだけで、段差や階段の踏破に必要なサブクローラの動作とクローラの進行速度の調整をロボットが自律的に行う [10]。筆者らは、ロボットの姿勢、サブクローラ角度、メインとサブクローラと地面の接触を計測し、自律的に動作を生成することを目指した。図6にロボットのモデルを示す。地面とサブクローラの接触をモータトルク T_f , T_r で、地面とメインクローラの接触を前後の PSD センサの距離 l_f , l_r で、本体の姿勢 θ_{roll} , θ_{pitch} は加速度センサとジャイロセンサで、サブクローラの角度 θ_f , θ_r をエンコーダで計測した。クローラ部分の接触をトルク T で計測しているのは、クローラベルトの内側に複数の力センサを取り付けることが困難であったためである。次に、筆者らは、不整地上り段差と下り段差の組み合わせで近似し、踏破動作を決定した。図7に登り段差の踏破動作を示す。下りも同様に動作を決めた。各種センサ情報を元に、図7に示す動作を実現する反射行動のルールを構築した。構築した動作のルールではその瞬間の各種センサ状態に応じて動作を即座に決めているため、踏破中に瓦礫が崩れても破綻することなく踏破動作を続けることができる。

図8に、Disaster City 内の Pancake house を探索するロボットとアメリカの Federal Emergency Management Agency (FEMA) の隊員にロボットの使い方を説明している写真を示す。図9に、崩れたフロアの下の狭い隙間で床には瓦礫が散らばっている場所を、半自律操縦支援シス

図 6 2-D model of crawler robot having flippers and unknown step (Upward step)

図 7 Our designed sequence of motions for getting over an upward step

図 8 Experimental setup in pancake house

図 9 Motion of semi-autonomous control in pancake house

テムを用いて探査する様子を示す。天井までの高さは、低いところで1[m]以下であった。床面に散らばった瓦礫を乗り越える動作はロボットが自律的に行うため、操縦者は天井との隙間が大きい場所を探して通り抜けることに集中できた。

4. お わ り に

本稿では、遠隔操縦を支援する技術のなかで、1. 俯瞰視

点操縦インタフェースと、2. 半自律操縦支援システムに関して説明した。これらの研究は、様々な移動ロボットに適応可能で、多くの場面で使われる方法や枠組みである。今後のさらなる発展が期待できる。

謝 辞 本研究は、文部科学省大都市大震災軽減化特別プロジェクト研究費、NEDO 戦略的先端ロボット要素技術開発プロジェクト「被災建造物内移動 RT システム」の研究開発の一環として行われたものである。

参 考 文 献

- [1] N. Shiroma, N. Sato, et al.: "Study on Effective Camera Images for Mobile Robot Teleoperation," 13th IEEE International Workshop on Robot and Human Interactive communication, 2005.
- [2] R. Murphy, et al.: "Cooperative Assistance for Remote Robot Supervision," Presence, vol.5, no.2, pp.224-240, 1996.
- [3] 城間直司, 長井宏和, 加護谷譲二, 杉本麻樹, 稲見昌彦, 松野文俊: "移動体の遠隔操作のための過去画像履歴を用いたシーン複合", 計測自動制御学会論文集, vol.41, no.12, pp.1036-1043, 2005.
- [4] C.W. Nielsen and M.A. Goodrich: "Comparing the Usefulness of Video and Map Information in Navigation Tasks," Proc. of HRI 2006, pp.95-101, Mar, 2006.
- [5] K. Ohno, T. Kawahara and S. Tadokoro: "Development of 3-D Laser Scanner for Measuring Uniform and Dense 3-D Shapes of Static Objects in Dynamic Environment," Proc. of the IEEE ROBOT2009, pp.2161-2167, 2009.
- [6] K. Nagatani, N. Tokunaga, Y. Okada and K. Yoshida: "Continuous Acquisition of Three-Dimensional Environment Information for Tracked Vehicles on Uneven Terrain," Proc. of the IEEE SSR2008, pp.25-30, 2008
- [7] http://www.isd.mel.nist.gov/US&R_Robot_Standards/Robotguide2009.pdf
- [8] 大野和則, 鈴木志穂子, 田所諭, 永谷圭司, 吉田智章, 小柳栄次: "Kenaf の半自律操縦支援システムと 3 次元操縦インタフェースの DisasterCity での実証実験", SICE SI2009, 2009.
- [9] M. Kim, W. Lee and S. Kang: "robhazdt3: Teleoperated mobile platform with passively adaptive double-track for hazardous environment applications," Proc. of IEEE/RSJ IROS2004, 2004.
- [10] K. Ohno, S. Morimura, S. Tadokoro, E. Koyanagi and T. Yoshida: "Semi-autonomous Control System of Rescue Crawler Robot Having Flippers for Getting Over Unknown-Steps," Proc. of IEEE/RSJ IROS2007, pp.3012-3018, 2007.
- [11] K. Nagatani, A. Yamasaki, K. Yoshida, T. Yoshida and E. Koyanagi: "Semi-autonomous Traversal on Uneven Terrain for a Tracked Vehicle using Autonomous Control of Active Flippers," Proc. of IEEE/RSJ IROS2008, pp.2667-2672, 2008.

大野和則 (Kazunori Ohno)

2004 年筑波大学大学院工学研究科博士課程修了, 博士 (工学)。神戸大学 COE 研究員, 東北大学助教を経て, 現在東北大学大学院情報科学研究科講師, さきがけ研究員。ロボットの環境認識の研究に従事。日本ロボット学会研究奨励賞, 第 3 回競基弘章学術貢献賞受賞。IEEE, 日本機械学会の会員。(日本ロボット学会正会員)

城間直司 (Naoji Shiroma)

1999 年筑波大学大学院工学研究科博士課程修了, 博士 (工学)。筑波大学機能工学系助手, オックスフォード大学リサーチアシスタント, 国際レスキューシステム研究機構研究員を経て, 現在茨城大学知能システム工学科准教授。ロボットビジョン, ロボットの遠隔操作系などの研究に従事。計測自動制御学会, 日本機械学会の会員。(日本ロボット学会正会員)