

ロボットの遠隔操作のための過去画像履歴を用いたシーン複合

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**

Synthesized Scene Recollection for Vehicle Teleoperation

Naoji SHIROMA*, Hirokazu NAGAI**, Georges KAGOTANI**,
Maki SUGIMOTO**, Masahiko INAMI** and Fumitoshi MATSUNO**

In this paper we propose an innovative view synthesis method for vehicle teleoperation, a synthesized scene recollection method, which provides the operator with a bird's-eye view image of the vehicle in an environment which is generated by using position and orientation information of the vehicle, stored image history data captured by a camera mounted on the vehicle, and the CG model of the vehicle. This method helps the operator to easily recognize the situation of the vehicle even in unknown surroundings and enables the remote operation ability of a vehicle to be improved. We also propose the different ways of presenting the synthesized bird's-eye view images to an operator. This method is mainly based on two technologies, vehicle positioning and image synthesis. To realize self-contained system of the proposed method we use scan matching of the scan data of a laser rangefinder for vehicle positioning. Experimental results for a robot in 2D horizontal plane are shown.

Key Words: teleoperation, bird's-eye view, image synthesis, positioning, scan matching

1. はじめに

1995年に発生した阪神淡路大震災以後、レスキューロボットシステムの研究開発が盛んに行なわれている。現在実環境でのロボットによる自律探索には技術的問題が多く、人間によるロボットの遠隔操作という形態がレスキューロボットにおいて現実的なひとつの解となっている^{1),2)}。ロボットの遠隔操作において、操作者がロボット周囲の環境およびロボット自身の状態を把握できればその遠隔操作感は格段に向上する。

これまでに移動体の遠隔操作手法についてさまざまな研究がなされている。それらの研究におけるシステム構成は、ほとんどが移動体にカメラを搭載し、遠隔地より搭載カメラ画像を用いて移動体操作を行なう形態である。そのようなシステム構成で移動体を直接目視せず、搭載カメラ画像のみを用いて遠隔操作を行なった場合、操作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、移動体自身そして移動体周囲の環境の状態を把握することが難しいことが原因のひとつとして挙げられる。

この遠隔操作の問題を克服するために、未知環境の3次元データを取得し、それらを用いて環境の3次元モデルを構築する³⁾、複数カメラあるいは全方位カメラなどによる広視野画像を用いる⁴⁾、移動体自身を俯瞰的に見るようなカメラなどの機構を付加する⁵⁾、そして、ほかの移動体からのビジョンサポートを利用する¹⁾方法などが提案されている。しかしながら、これらの方法には、未知環境の3次元モデルを構築するのに処理時間が掛かったり、動的に変化する環境への対処が不十分であったり、コスト、サイズ、重量、計算量、そして、移動体の台数の増加を招いたりするという不利な点も存在する。また、移動体を通った経路に沿ったシーンをパノラマ表現で記憶し、後にそれを利用する研究が存在する⁶⁾。これに対して、本研究では緩やかではあるが動的に変化する環境における遠隔操作性の向上を目指し、画像の時空間情報より生成した移動体を俯瞰的に見た画像を提示するリアルタイムの技法を提案するものである。この手法を用いることにより、先に述べた移動体の遠隔操作の問題を克服することが可能である。

一方、遠隔操作における別の問題として、データサイズの大きいカメラ画像を送受信するのは通信網の多大な負荷となるという通信の問題が挙げられる。時間遅れの存在するマニピュレータの遠隔操作において、その時間遅れに対処するためにコンピュータ内に構築した環境モデルをもとに予測ディスプレイを用いたり、力覚情報をフィードバックしたりする研究が行なわれている^{7),8)}。これに対し、本論文で提

* 国際レスキューシステム研究機構

川崎市川崎区南渡田町 1-2

** 電気通信大学電気通信学部 調布市調布ヶ丘 1-5-1

* International Rescue System Institute, Kawasaki

** University of Electro-Communications, Chofu

(Received April 20, 2005)

(Revised September 16, 2005)

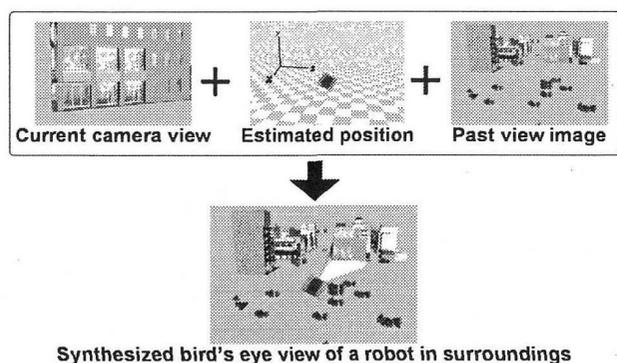


Fig. 1 Overview of bird's-eye view synthesis

案する手法は、環境モデルを構築しないイメージベーストな手法である。また、本手法は、時間遅れに直接対処するものではないが、データ送信のコンテンツを状況によって切り替えて使用することが可能であり、それにより通信容量の低い状況においても適用可能である。詳しくは第2章で述べる。

本稿では、過去画像履歴を用いたオペレータへの画像提示法を提案する。本論文の構成は以下のとおりである。第2章では、遠隔操作性を向上させる俯瞰視点画像生成手法について述べる。第3章では、複合画像生成技術および2次元平面上を移動すると仮定して本手法を具体的に説明する。第4章では、移動体の位置・姿勢推定技術について述べる。第5章では、提案手法の2次元水平面内を移動するロボットへの実現例を示し、最後に本論文をまとめる。

2. 俯瞰視点画像生成アルゴリズム

本研究での遠隔操作性を向上させる俯瞰的複合画像の生成は、主に以下の技術に基づき実現される。

- 移動体の位置・姿勢推定技術
- 移動体の推定位置・姿勢と移動体により撮像された過去画像履歴による時空間情報に基づいた複合画像生成技術

Fig. 1 は、この俯瞰的複合画像生成法の概念を示したものである。上図の左画像は、移動体搭載カメラからの現在の画像、上図の中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。上図の右画像は過去画像履歴より選択された移動体を俯瞰的に見る視点からの背景画像である。これらの情報とあらかじめ生成されている移動体CGモデルより下図の環境中の移動体を俯瞰的に見た複合画像を生成する。

移動体遠隔操作時に複合画像を提示することにより、オペレータは移動体自身や未知環境の状態を容易に把握でき、遠隔操作性を向上することが可能となる。Fig. 1 の概念を実現する俯瞰視点画像生成アルゴリズムは以下のようになる。

俯瞰視点画像生成アルゴリズム

- (1) 移動体操作時常に、移動体の現在の位置・姿勢情報を取得する（位置・姿勢情報取得）

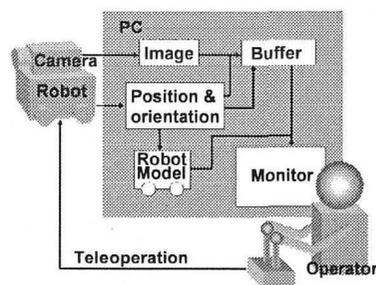


Fig. 2 System overview

- (2) 移動体から撮像された画像をその位置・姿勢情報と共にバッファ内に取り込む（履歴画像保存）
- (3) 現在の移動体位置・姿勢に基づき、バッファ内に保存された画像の中から複合画像生成に適した画像を選択し、その選択された画像が撮像されたカメラの位置・姿勢を視点位置とする（履歴画像を基に視点の選択）
- (4) 現在の移動体の位置・姿勢情報に従って、先の視点位置から見た移動体のCGモデルを描画する（移動体モデルの描画）
- (5) 選択した視点位置から見た移動体モデルを履歴画像にマッピングする（俯瞰視点画像生成）
- (6) これらの処理を繰り返す

ここで、(1)は移動体の位置・姿勢推定技術、(2)~(5)は複合画像生成技術に基づいて実現される。本アルゴリズムを実装するためのシステムの概要をFig. 2に示す。カメラ画像は、そのときのカメラの位置・姿勢情報（視点位置情報）と共にバッファ内にビットマップ形式で保存される。最適な視点位置は、バッファ内に画像と共に保存された視点位置情報により判定される（詳細は次章で述べる）。Fig. 3に示すように、選択された画像は俯瞰視点画像の背景画像として使用される。この背景画像は実時間のものでないで動的な環境に実時間に対処するものではない。しかし、ある程度短時間前の画像を背景画像として用いることにより、画像の時間的な遅れよりも環境の変化のほうが緩やかな（擬似実時間）場合には、緩やかではあるが動的に変化する環境への対処が可能である。

また、本システムは、イメージベーストな手法であるため、3次元の環境モデルを構築する必要がなく、このような俯瞰視点画像の生成においても処理時間が少ないことが期待できる。さらに、本手法は、データ容量の大きい画像は低頻度で、データ容量の小さい移動体の位置情報は高頻度で伝送するなどデータ送信のコンテンツを状況によって切り替えて使用することが可能で通信容量の低い回線においても実装が可能である。また、詳しくは第5章で述べるが、本手法は、俯瞰的・客観的な視点画像を利用することで移動体オペレータのカメラ酔いや方向感覚喪失の低減、移動体をワイヤフレーム表現することで死角の低減などさまざまな特徴を有している。

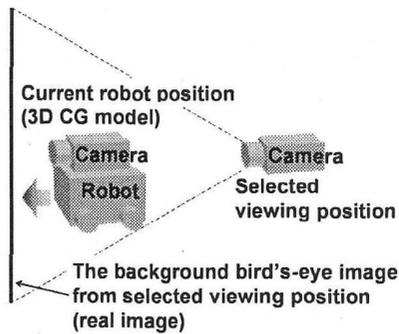


Fig. 3 Pseudo real-time view

3. 複合画像生成技術

本章では、第2章で示した俯瞰視点生成アルゴリズムの実装に必要な複合画像生成技術について述べる。そのコア技術は第2章で提案した俯瞰視点画像生成アルゴリズムのステップ(3)の視点位置選択手法である。この視点としては、固定俯瞰視点、移動俯瞰視点がある。遠隔操作を行なうオペレータへの複合画像の提示は、これらの手法の中から選択される、あるいはこれらの組み合わせにより行なわれる。また、この視点位置選択手法は、オペレータのマニュアル操作による視点位置の指定などへと拡張が可能である。

3.1 固定俯瞰視点をを用いた複合画像生成法

この手法では、視点位置は固定され、常に同じ画像が背景画像として使用される。オペレータには、環境中で動く移動体を固定視点位置から見た複合画像が提示される。

Fig. 4は、固定俯瞰視点をを用いた移動体遠隔操作複合画像提示手法の適用事例^(注1)のひとつである。図(a)は実装に用いたロボットである。図(b)は、ロボット搭載カメラからの実画像、図(c)は、背景画像をある固定された視点での固定された過去画像とし、ロボットの位置・姿勢およびロボットの形状モデルの情報より生成した複合画像である。図の同じ列の画像は同時刻のものである。図(b)のロボット搭載カメラからの実画像のみでは、ロボットと周りの環境の把握、ロボット自身の環境中での状況の把握がしにくいのがわかる。図(c)は、本手法により生成された複合画像であり、ロボットの環境内での状態およびロボット周囲の環境の状況の把握が容易になり、遠隔操作性を向上させることができる。

3.2 移動俯瞰視点をを用いた複合画像生成法

この俯瞰視点を移動させる手法においては、以下に示す4種類の視点位置選択手法を用いた画像提示法を提案する。

- (1) リアルタイム画像提示法
- (2) 一定時間遅れ画像提示法
- (3) 一定距離背後位置画像提示法

(4) 視野領域内判定画像提示法

3.2.1 リアルタイム画像提示法

移動体搭載カメラからリアルタイムに出力される画像を、そのオペレータにそのまま提示する手法である。これは、通常行なわれる基本的な遠隔操作作用の画像である。

3.2.2 一定時間遅れ画像提示法

一定時間前の画像をバッファ内に保存された過去画像履歴の中から選択し、そのときのカメラ位置を視点位置とした複合画像を背景画像としてオペレータに提示する。これにより、移動体から離れた背後の場所から俯瞰的に移動体を見た画像提示を実現することができる。

この手法では、一定時間の間に撮像された画像を保存するのに必要なメモリ空間をバッファ内に確保し、その保存された画像の中でもっとも古い過去に撮像された画像が複合画像の背景として選択され、その画像に関連した位置・姿勢情報が複合画像視点位置として使用される。現時刻の最新の撮像された画像がバッファ内に挿入される度に、一番古い画像がバッファ内から削除される。

3.2.3 一定距離背後位置画像提示法

移動体の背後から一定距離に離れた位置でのカメラ視点に最も近い視点位置で撮像された画像を、過去画像履歴の中から選択し提示する手法である。3.2.2で説明した一定時間遅れ画像提示法では、移動体が停止したときに複合画像視点位置が移動体の現在位置に追いついてしまうが、この手法では、視点位置が追いつくことはない。

3.2.4 視野領域内判定画像提示法

本手法は、前節で述べた一定距離背後位置画像提示法において、カメラ視野範囲を考慮して画面内に移動体モデルをオペレータが視認できるようにしたものである。カメラ位置・姿勢、カメラパラメータおよび現在の移動体の位置・姿勢の関係より空間中のある位置に存在する移動体が、カメラ画像上のどの位置にどの程度の大きさで表示されるかを求めることができる。保存画像によってはどの画像内にも現在の位置にいる移動体が存在しない場合も生じる。したがって、本手法での背景画像の選択は、画像上での移動体の表示位置および大きさをもとに以下に行なう。まず、移動体とカメラ視点との望ましい相対位置関係をあらかじめ与えておく。この望ましい相対位置関係は、カメラパラメータや移動体の大きさなどに依存し決定されるものである。つぎに、選択した保存画像に対応する視点位置と推定された現在の移動体位置の相対位置関係がこの目標とする相対位置関係に最も近い保存画像を求め、背景画像として用いる。

バッファ内に保存された各画像に関連した位置・姿勢情報すべてがこの手法では利用される。バッファへの新しい撮像画像の挿入は、使用バッファの記憶領域節約を考慮して、移動体が規定された以上の距離あるいは姿勢だけ移動、回転するまでは行わず、新しい画像をひとつ挿入することに古い画像がひとつ消去される。よって、バッファ内の保存画像は連続的に撮像されたものになるとはならず、移動体の動

(注1) Fig. 4は、複合画像生成技術の有効性のみを示すために画像処理はオフラインで行ない、ロボットの位置・姿勢は、外部設置センサにより求めている。

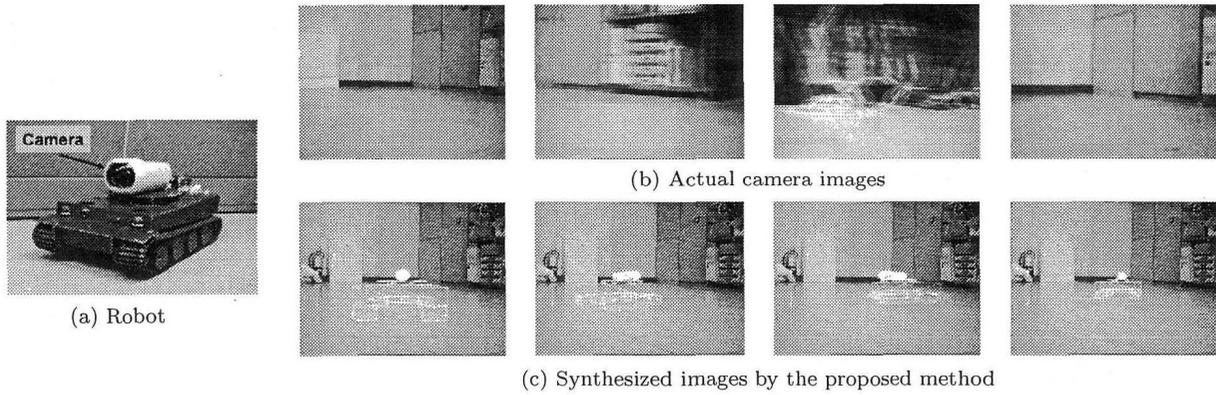


Fig. 4 Example of fixed viewing position synthesis

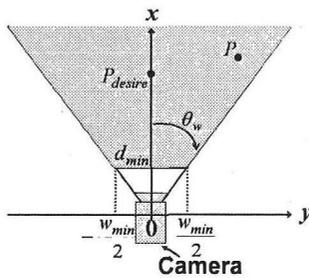


Fig. 5 Top view of Field of View

きにより離散的に分布した場所から撮像されたものとなる。以下に、移動体が2次元水平面上を移動すると仮定して本手法を具体的に説明する。

搭載カメラの上からみた図を Fig. 5 に示す。選択視点位置のカメラセンタの地面への射影点を原点とし、カメラ中心線の地面への射影線を x 軸、 y 軸はそれと直交するようとり、座標系 $o-xy$ を規定する。Fig. 5 で、影付きの領域は、搭載カメラから視認できる領域（視野領域）を表わしている。ここで、 θ_w [rad] は水平画角の半分の角度である。Fig. 6 に y 軸方向からカメラを見た図を示す。ここで、 θ_h 、 θ_p 、 H_c は、それぞれ、垂直画角の半分の角度、カメラ中心線の水平線からのピッチ角、地面からのカメラの高さである。視野領域 S は、Fig. 5 に示す d_{min} と w_{min} を用いて、 $S = \{(x, y) | x \geq d_{min}, y \leq \frac{w_{min}}{2d_{min}}x, y \geq -\frac{w_{min}}{2d_{min}}x\}$ と表わされる。ここで、 d_{min} 、 w_{min} は

$$d_{min} = \frac{H_c}{\tan(\theta_p + \theta_h)}, \quad (1)$$

$$w_{min} = 2 \frac{d_{min}}{\cos(\theta_p + \theta_h)} \cos \theta_h \tan \theta_w \quad (2)$$

と与えられる。あらかじめカメラパラメータや移動体の大きさなどを考慮して与えられたカメラからの望ましい相対位置関係を与える。この望ましい位置にある移動体の xy 平面上の位置を P_{desire} 、現在の移動体の推定位置から求められた xy 平面上での移動体の位置を P とする。本手法における背景画像選択法はバッファ内に保存されている画像の中から $P \in S$ となる画像を選択し、選択された画像に対する

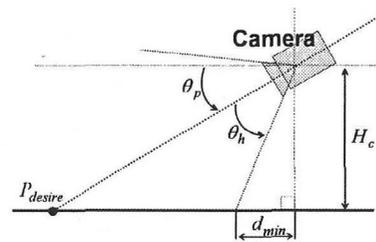


Fig. 6 Side view of the camera configuration

点 P と望ましい移動体の位置 P_{desire} との距離が最小となる画像を背景画像として選択するものである。

3.2.5 背景画像更新頻度

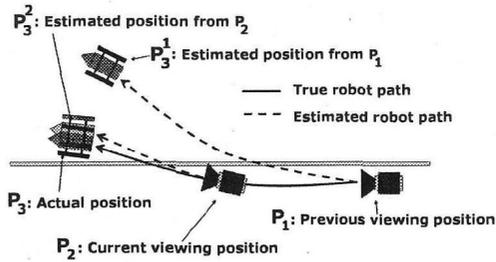
各画像提示法における背景画像の更新頻度は、移動体の移動速度や移動環境などに合わせて調整する必要がある。この背景画像更新頻度決定のひとつの指針として、選択背景画像視点に対応する過去の移動体と現在の移動体との相対位置・姿勢の推定量と目標値からの誤差確率分布の利用が挙げられる。この誤差分布が増大したら背景画像を更新するなど、相対位置・姿勢誤差を管理することによりその実現を図るのである。しかし、具体的なアルゴリズムの実装には至っておらず、これは今後の課題である。

4. 移動体の位置・姿勢推定技術

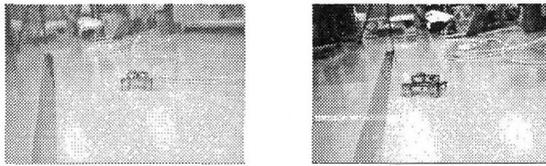
本章では第2章で示した俯瞰視点生成アルゴリズムの実装に必要な移動体の位置・姿勢推定技術について述べる。

4.1 複合画像生成に必要とされる移動体位置・姿勢推定法

前章までに複合画像の視点位置選択手法について述べた。それぞれの選択手法における複合画像の生成には、現在の移動体の位置・姿勢および選択した過去画像を撮像した移動体の位置・姿勢間の相対的な位置関係がわかれば十分であり、必ずしも絶対的な位置・姿勢情報は必要としない。広範囲を作業空間とする移動体の自己位置・姿勢推定は、GPSなどの絶対位置を計測可能な特別なセンサを使える環境以外では、通常デッドレコニングなどの積分型の位置・姿勢推定が行なわれる。そこで問題になるのが移動距離や時間の経過



(a) Schematic figure of the relative positioning teleoperation



(b) Synthesized view from P1 (c) Synthesized view from P2

Fig. 7 Only some accurate relative positioning is required in this teleoperation method

に伴う累積誤差の蓄積による推定位置・姿勢誤差の拡大である。本手法は、移動体の相対的な位置・姿勢推定のみでも実行可能であり、自己位置・姿勢推定における累積誤差の影響を抑えることができる。

Fig. 7 は、この相対位置・姿勢に基づいた複合画像生成法の有効性を示す概念図である。図 (a) において、実曲線は移動体が実際に進んだ経路、移動体は P₁, P₂ と移動し、現在 P₃ の位置にある。また、点線は推定した移動体の移動経路、薄い太実直線は目標経路である。

位置 P₁ からの相対位置の推定値を用いた現在の移動体の推定位置は誤差が蓄積して P₃¹ となる。その推定値に基づき位置 P₁ で撮像した画像を用いて複合画像を生成すると、図 (b) となり現在の移動体の位置とは大きくずれた画像となってしまう。これに対して、P₁ から移動した位置 P₂ からの相対位置の推定値を用いた現在の移動体の推定位置は P₃² となり、誤差の蓄積が少ない分だけ P₃¹ より良い推定となる。この推定値に基づき位置 P₂ での画像を用いて複合画像を生成すると図 (c) となり、P₁ での画像を用いた場合に比べ実際の状況に近い画像を提示できる。このように本手法は、過去に画像を取得した位置を現在位置に近いものに更新し、その位置からの現在の位置までの相対的推定量を用いるため、自己位置推定における累積誤差の影響を抑えることができる。

移動体の自己位置推定法で、外部センサを使わない方法として、エンコーダで車輪の回転数をジャイロで移動体の姿勢を計測して推定を行なうものがある。本研究では、より高精度な推定を期待できるレーザレンジファインダを用いたスキャンマッチングによる移動体の自己位置推定を適用する。

4.2 スキャンマッチングによる自己位置推定法

4.2.1 スキャンマッチング

レーザレンジファインダからの2つのスキャンデータ(参照スキャン R_n および入力スキャン S_n)を用いたスキャン

マッチングにより、移動体の移動した相対並進移動量 dt および相対姿勢回転量 dR を決定する。最小二乗法によるデータの位置合わせを行なう ICP (Iterative Closest Point) アルゴリズム^{9),10)} は、よく知られた局所的なデータのスキャンマッチングを行なう方法である。本研究では、ICP アルゴリズムを用い、移動体の相対並進移動量および相対姿勢回転量を求める。使用するスキャンマッチングは、以下のようである。

スキャンマッチングアルゴリズム

(1) 最短距離点ペアの決定

入力スキャン S_n 内のすべての点 s_i ∈ ℝ³ に対し、各点に対応する最短距離の点 r_i ∈ ℝ³ を参照スキャン R_n 内の点より求める。

(2) 誤対応ペアの抑制

入力・参照スキャンの最短距離点ペア (s_i, r_i) 中、対応点間距離 |s_i - r_i| が規定した閾値 δ 以上のペアを削除する。

(3) スキャンデータの図心を原点とする

入力および参照スキャンの図心 s_c, r_c を求め、すべての最短距離点ペア (s_i, r_i) に対し、対応する図心をその座標値より引き、各図心をその座標原点にする。

$$s_c = \frac{1}{N} \sum s_i \quad r_c = \frac{1}{N} \sum r_i \quad (3)$$

$$s'_i = s_i - s_c \quad r'_i = r_i - r_c \quad (4)$$

ここで N は、最短距離点ペアの個数である。

(4) 相関行列を求める

相関行列 H は以下のようにして得ることができる。

$$H = \sum r'_i s'^T_i \quad (5)$$

(5) 微小相対並進移動量、微小相対姿勢回転量を求める

相関行列 H の特異値分解は、以下のように表わされる。

$$H = UDV^T \quad (6)$$

ここで、行列 D は行列 H の特異値を対角要素に配列した対角行列。行列 U, V は行列 D の対角要素である行列 H の各特異値に対応する左あるいは右特異ベクトルを列ベクトルとして、その対応する順番に並べて構成される正規直交行列である。行列 U, V を用いて微小相対並進移動量 dt, 微小相対姿勢回転量 dR は以下のように得られる。

$$dR = VU^T, \quad dt = r_c - dRs_c \quad (7)$$

(6) 入力スキャンを (dR, dt) 移動

求めた微小相対並進移動量, 微小相対姿勢回転量 (dR, dt) 分だけ入力スキャンを移動する。

(7) この操作を繰り返す

4.2.2 移動体の位置推定

移動体の並進移動量, 姿勢回転量は、各スキャンマッチングごとの微小相対並進移動量 dt および微小相対姿勢回転量

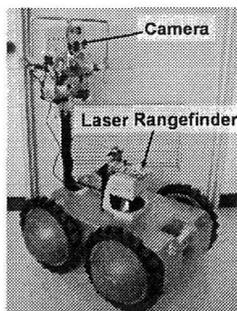


Fig. 8 A four-wheeled rescue robot FUMA with RS4-4

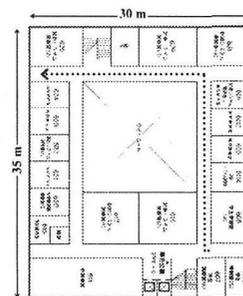


Fig. 9 Sketch map of the environment

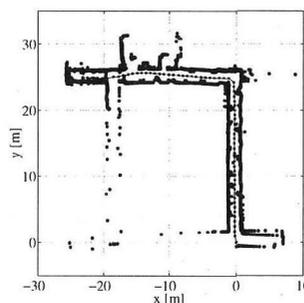


Fig. 10 The positioning experiment result

dR を積分することで求められる。スキャンマッチングによる移動体の位置推定は、以下のようなものである。

移動体の位置推定アルゴリズム

- (1) 移動体の初期位置において最初のスキャンを行ない、このスキャンデータを参照スキャンとして登録する。このとき、参照スキャンが行なわれた移動体の位置・姿勢も同時に記憶する。その後のスキャンデータは、指定された条件を満たさない限り入力スキャンとして利用される。
- (2) つぎのスキャンデータが得られたら、それを入力スキャンとして、参照スキャンとのスキャンマッチングを行なう。これにより、移動体の相対的なモーシオン（相対並進移動量、相対姿勢回転量）を得ることができる。
- (3) 得られた移動体の相対的なモーシオンを参照スキャンとともに登録された移動体の位置・姿勢に加えることにより現在の移動体の位置・姿勢の推定値を計算する。
- (4) 指定された並進移動量または姿勢回転量以上移動体が移動してゐるならば、参照スキャンを更新する。
- (5) (2) へ戻り、この操作を繰り返す。

このスキャンマッチングは、移動体の位置・姿勢推定のためのものであるが、移動体の推定位置・姿勢をもとに各スキャンデータを繋ぎ合わせるにより、環境地図を作成することが可能である。この位置・姿勢推定手法は、参照スキャンを更新しているため、累積誤差を含む積分型の自己位置推定手法となっている。

4.3 スキャンマッチングによるロボットの位置推定実験

4.3.1 実験装置

実験環境を2次元平面とし、移動ロボットとして、われわれが開発している四輪型ロボット FUMA¹¹⁾ (Fig. 8) を用いる。FUMA の車体上部にレーザレンジファインダ (Lenze 社の RS4-4) を搭載した。RS4-4 は、スキャン範囲が、センサ前方、角度 190 [deg]、距離 50 [m] である。センサの分解能は、角度 0.36 [deg]、距離 5 [mm] である。

4.3.2 位置推定実験

4.2.2 の位置推定アルゴリズムのステップ (4) において参照スキャン更新のために指定すべき並進移動量および姿勢回転量は、環境に依存し実験的に決定される。スキャンマッチングにおけるセンサ誤差は、参照スキャンを更新するごと

に累積されていくので、参照スキャンの更新は、頻繁には行なわず、スキャンマッチングが精度良く行なえる程度の移動があったごとに行なうようにした。実験を通した試行錯誤の結果、本実験では以下のようにパラメータを与えた。

- 1 スキャン内でのスキャン点数: 133 (1.44 [deg] ごと)
- 最短距離点ペア間の最大距離閾値: 500 [mm]
- スキャンマッチングのサンプルレート: 100 [msec]
- 参照スキャンの更新条件: 並進移動距離 200 [mm] または回転角度 5 [deg] 以上のモーシオンごと

本実験ではスキャンマッチングを含めたすべてのロボットの位置・姿勢推定プロセスは、リアルタイムに実行することが可能である。

全長 16.5 [m] (往復 33 [m]) の L 字型経路を、直進と並進を組み合わせるロボットに往復走行させたときの実験では、スタート地点に戻ってきたときのロボットの推定自己位置の x , y 座標の誤差は、それぞれ、25 [cm]、-45 [cm] であり、姿勢誤差は、ほぼ 0 [deg] であった。移動距離に対する並進誤差は 2% 程度である。

Fig. 9 は、ロボットの移動時の位置推定実験を行なった環境の見取り図である。実験においてロボットは、Fig. 9 の点線の矢印で示された L 字型の経路を走行した。図中右下がスタート地点、左上がゴール地点である。Fig. 10 は、ロボットの長距離移動時の位置推定実験結果である。図中の小さな丸を結ぶ線はロボットの走行経路を表わしている。図中の濃い大きな点は経路周辺の物体上の点を表わしており、ロボットが走行した経路周辺の環境地図を形づくっている。Fig. 9, Fig. 10 より、実際にロボットが走行した経路と推定した経路がほぼ一致しており、スキャンマッチングによりロボットの位置・姿勢推定が行なえていることがわかる。

5. 俯瞰視点画像生成アルゴリズムの実装

本章では、前章までに述べた俯瞰視点画像生成に必要な技術を統合し移動ロボット FUMA に実装する。なお、本実験では、移動環境として 2 次元平面を仮定している。ロボットの位置・姿勢推定にはスキャンマッチングを用い、複合画像生成には視野領域内判定画像提示法を用いた。

Fig. 11 は、本手法を FUMA に実装しリアルタイムで実行した一例である。これは FUMA が、全体で並進 25 [m]、回転 420 [deg] の移動を行なった後のようすを示したものであり、各図は同時刻のものである。図 (a) は外部設置カメラより実験中の FUMA のようすを捉えたもの、図 (b) は FUMA 搭載カメラからの画像、図 (c) は本手法により生成された俯瞰的複合画像である。図 (b) の FUMA 搭載カメラ画像からでは環境中のロボットの状態を把握するのは困難であるのに対して、図 (c) の生成複合画像は、環境中のロボットの状態を良く表現していることがわかる。

Fig. 12 は、実現例のスナップショットである。視野領域内判定画像提示法を用いているので、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。Fig. 12 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ようす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、移動体の遠隔操作性の向上を図ることが可能となる。

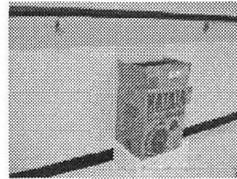
本手法は、第 2 章で述べたように通信容量の低い通信状況においても適用可能であり、データ容量の大きい画像を頻繁に伝送する必要がなく、また、環境モデルを構築しないイメージベーストの画像生成であるため、複合画像生成におけるリアルタイム性が高い。したがって、擬似実時間という意味で変化の緩やかな動的な環境への対応が可能であるといった利点がある。また、移動体をワイヤフレーム表現することにより移動体自身を透かしてその先の光景を確認することができ、遠隔操作における死角の低減化が可能である。さらに、実画像にノイズが入っていたとしても、ノイズの少ない過去の画像を背景画像として選択することでノイズによる画像の乱れの影響を減らすことができる。また、離散的な過去の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オペレータのカメラ酔いや方向感覚喪失の低減などを図ることが可能である。本手法は、ロボットの遠隔操作のみならず、あらゆる移動体の操作へ適用可能な技術である。

6. おわりに

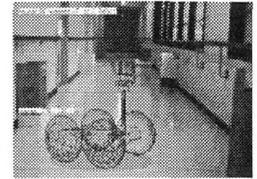
本論文では、過去画像履歴を用いた移動体のオペレータへの遠隔操作作用複合画像提示法について提案し、相対位置



(a) External camera image of FUMA



(b) Direct camera image



(c) Synthesized image

Fig. 11 One scene of FUMA at the experiment

に基づく本手法の有効性について述べた。また、レーザレンジファインダを用いたスキャンマッチングによる移動体の位置・姿勢推定情報に基づいた移動体単体で閉じたシステムとしての実現例を示した。提案した手法により、移動体のオペレータは、移動体自身の状態およびその周りの環境の状態を容易に把握することができ、遠隔操作性を向上させる。これはロボットによるレスキュー活動への適用など、現実的なアプリケーションへの応用へと繋っていく。

今後、本手法の 3 次元空間への実装の拡張を行なっていく予定であり、その実現により、より実際に近いレスキュー現場などへの応用が可能となる。これには、不整地環境での移動体の 3 次元の自己位置推定手法の確立が重要な問題となる。また、移動体の自己位置・姿勢推定においては、1 台のカメラのみを用いた移動体の自己位置・姿勢推定¹²⁾の実装を行なうことができる。これにより、よりコンパクトで安価なシステムを実現することができ、その応用範囲を広げていくことが可能となる。これらは今後の課題である。

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のもとで行なわれたものである。

参考文献

- 1) R. Murphy, et al.: Cooperative Assistance for Remote Robot Supervision, *Presence*, 5-2, 224/240 (1996)
- 2) S. Tadokoro, H. Kitano, et al.: The RoboCup-Rescue Project: A Robotic Approach to the Disaster Mitigation Problem, *International Conference on Robotics and Automation*, San Francisco, USA, 4090/4095 (2000)
- 3) M. Lhuillier and L. Quan: Quasi-dense reconstruction from image sequence, *Proc. of European Conference on Computer Vision*, 125/139 (2002)
- 4) 米田, 山澤, 竹村, 横矢: 全方位動画からの両眼ステレオ画像生成による移動ロボットの遠隔操縦, 電子情報通信学会技術研究報告, PRMU2000-107, Nove. (2000)
- 5) 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*, Kurashiki, Japan (2004)
- 6) 辻三郎: 環境のパノラマ表現, 電子情報通信学会誌, 74-4, 354/359 (1991)
- 7) 神徳徹雄: 環境モデルを用いた遠隔マニピュレーションシステ



Fig. 12 Example of Field of view evaluated image teleoperation

- ム, 機械研ニュース, 479, 1/4 (1991)
- 8) 松丸, 川端, ほか: 通信回線を介したロボットの遠隔操作におけるタスク規範型データ伝送手法, 日本ロボット学会誌, 17-8, 1114/1125 (1999)
 - 9) P. J. Besl and N. D. McKay: A Method for Registration of 3-D Shapes, *IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 14-2, 239/256 (1992)
 - 10) Z. Zhang: Iterative Point Matching for Registration of Free-Form Curves and Surfaces, *International Journal of Computer Vision*, 13-2, 119/152 (1994)
 - 11) Y. Chiu, N. Shiroma, et al.: FUMA: Environment Information Gathering Wheeled Rescue Robot with One-DOF Arm, *International Workshop on Safety, Security and Rescue Robotics* (2005)
 - 12) A. J. Davison: Real-Time Simultaneous Localisation and Mapping with a Single Camera, *International Conference on Computer Vision* (2003)

[著者紹介]

城間直司



1971年5月21日生。94年琉球大学工学部電子・情報工学科卒業。99年筑波大学大学院博士課程工学研究科構造工学専攻修了。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を経て, 現在国際レスキューシステム研究機構研究員。非ホロノミック系制御, 移動ロボット, 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。日本ロボット学会会員。

長井宏和



1982年12月22日生。2005年電気通信大学電気通信学部電子工学科卒業。現在東京大学大学院修士課程新領域創成科学研究科環境学専攻人間工環境学コースに在籍。レスキュー工学, ロボットの遠隔操作系, ウェアラブル情報システムなどの研究に従事。

加護谷 譲二



1982年2月20日生。2003年電気通信大学電気通信学部知能機械工学科卒業。現在, 同大学大学院電気通信学研究科知能機械工学専攻博士前期課程に在籍中。ロボットの遠隔操縦インタフェースに関する研究に従事。日本バーチャルリアリティ学会会員。

杉本麻樹



1978年3月11日生。2000年千葉工業大学工学部電子工学科卒業。2002年同大学大学院工学研究科博士前期課程情報工学専攻修了。同年から2003年まで, 東京大学大学院情報学環研究補佐員を経て日本電信電話(株)NTTコミュニケーション科学基礎研究所人間情報研究部客員研究員。2003年10月から電気通信大学大学院電気通信学研究科博士後期課程機械制御工学専攻。非言語情報を利用したヒューマンインタフェースなどの研究に従事。日本学術振興会特別研究員, 日本バーチャルリアリティ学会会員。

稲見昌彦



1972年2月12日生。99年東京大学大学院工学研究科博士課程修了。博士(工学)。東京大学リサーチアソシエイト, 東京大学助手, 電気通信大学講師を経て, 現在電気通信大学知能機械工学科助教授。科学技術振興機構さきがけ研究者, MIT CSAIL 客員研究員を兼任。バーチャルリアリティ, テレプレゼンテーション, ヒューマンインタフェースなどの研究に従事。日本ロボット学会会員。

松野文俊(正会員)



1957年7月26日生。86年大阪大学大学院基礎工学研究科博士課程修了。大阪大学基礎工学部助手, 神戸大学工学部講師, 助教授, 東京工業大学大学院総合理工学研究科助教授を経て, 2003年電気通信大学教授(知能機械工学科)となり, 現在に至る。主に, ロボティクス・制御理論・レスキュー学に関する研究に従事。2002年よりNPO国際レスキューシステム研究機構理事・川崎ラボリーダ(2005年より副会長)。89年度日本ロボット学会研究奨励賞, 93年度システム制御情報学会論文賞, 97年度消防防災科学論文賞(消防庁長官表彰), 2001年度計測自動制御学会論文賞・武田賞などを受賞。IEEE, 日本機械学会, GIS学会, 情報処理学会などの会員。工学博士。