

ベルト型インタフェースによる 移動ロボット操作のためのテレプレゼンスシステム

杉 山 淳[†] ティエティエルコブ ズミトリ^{††} 三 浦 純^{†††}

本稿では、ベルト型インタフェースを使用した移動ロボット操作のためのテレプレゼンスシステムについて述べる。本システムはロボットと環境中の障害物との接近情報を操縦者にフィードバックすることで環境を正確に把握でき、ロボットを安全に操縦可能なシステムである。本システムではロボットに搭載したレーザ距離センサ（LRF）により、ロボット周辺の最近障害物とその形状の検出、さらに移動障害物の追跡を行い、これらの情報をロボットの操縦者が装着するベルト型インタフェースにより振動としてフィードバックする。また、インタフェースは同時に操縦者の上体の姿勢を測定してロボットの移動を操作する。このようなロボットシステムには、高次元の没入感を得られ、移動ロボットの操作を容易にする大きな可能性があると考えている。

Telepresence System for Mobile Robot Control using a Belt Interface

JUNICHI SUGIYAMA,[†] DZMITRY TSETSERUKOU^{††} and JUN MIURA^{†††}

This paper focuses on construction of a novel telepresence system intended for mobile robot control. The robotic system consists of mobile robot and wearable master robot. The elaborated algorithms allow the robot to precisely recognize the distance, direction, shape, and speed of the obstacle by means of the laser range finders (LRF) installed on the mobile robot. The newly designed tactile belt interface receives the detected information and maps it through the vibrotactile patterns. We designed the patterns in such a way that they convey the obstacle parameters in more intuitive and robust manner. The robot movement direction and speed is governed by the attitude and tilt of the user's torso. We believe that the developed robotic system has a significant potential to facilitate navigation of mobile robot while providing a high degree of immersion into remote space.

1. はじめに

テレプレゼンスロボットシステムは、人間とロボットが異なる場所に存在する場合でも、視覚・聴覚・触覚といった刺激によって、あたかも同じ場所に存在するかのように感じさせるシステムである。遠隔地のロボットを操作する場合、ロボットやロボットが存在する環境を把握するために、直感的で没入感が得られる遠隔ロボットインタフェースには大きな必要性がある。

ここでは、人間がロボットを安全に操作するためにテレプレゼンスロボットシステムを用いることを考える。本システムは、ロボットに搭載したレーザレンジファインダ（LRF）から得た測距点列より、ロボット周辺の最近障害物や移動障害物を検出し、ロボットとの位置関係、凹凸等の形状や移動速度を操縦者に送り、そして、送られた情報は操縦者側の複数の振動モータを持つベルト型インタフェースにより振動の強弱として伝える。操縦者は、障害物の情報を元にロボットを操縦することで、ロボットを安全に操作できる。LRFを使用した移動障害物検出には、例えば、数フレームの測距点列をグリッド地図化して、移動体の軌跡を検出対象毎にモデル化し、それに基づいて特定のクラスの移動体を検出・識別するものがある¹⁾。本システムの手法では、障害物の種類によらない検出と追跡を行うために、地図と現在の観測との差分による検出とカルマンフィルタ（KF）による移動推定を行う。

[†] 豊橋技術科学大学 情報工学専攻

Department of Information and Computer Sciences,
Toyohashi University of Technology

^{††} 豊橋技術科学大学 エレクトロニクス先端融合研究所

Electronics-Inspired Interdisciplinary Research Institute,
Toyohashi University of Technology

^{†††} 豊橋技術科学大学 情報・知能工学系

Department of Information and Computer Sciences,
Toyohashi University of Technology

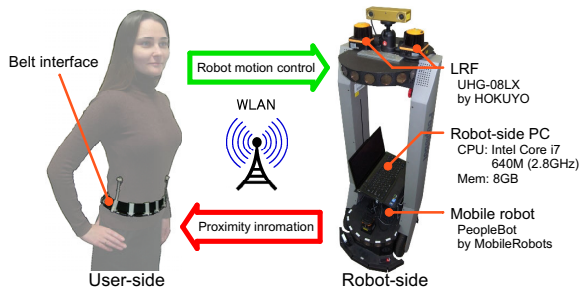


図 1 システムの概要
Fig. 1 System overview

表 1 LRF の仕様

Table 1 Specification of the LRF

Measurable range	8000mm, 270°
Angular resolution	about 0.36°

2. システム概要

本システムは主に、ロボットと操縦者側のロボット操作と接近情報を振動として伝えるベルト型インタフェースから構成されている。障害物検出は、ロボットの上に搭載した 2 台の LRF によって取得した全周の測距点列を使用して行う。本システムの概要図を図 1 に、LRF の仕様を表 1 に示す。

3. LRF データ処理

本システムにおける障害物の検出は、ロボットに搭載した 2 台の LRF の測距点列を使用して行う。図 4(a) に画像化した測距点列の一部を例として示す。この図では、灰色の十字の中央（黒丸）がロボット、上側がロボットの前方向となっており、障害物がない場合を白色で、存在する場合を緑色で表してある。また、10 ピクセル/m の解像度で、全体のサイズは 169×169 ピクセルである。

LRF データ処理で得られる情報は全てロボット座標系でのデータに変換し、操縦者とロボットの方向を一致させたときのロボット周辺の環境を捉えられるようにしている。以降では、最近点とその付近の形状検出と移動障害物の検出・追跡について述べる。

3.1 最近点・形状の検出

ロボットに最も近い障害物を検出することは、その時点でのロボットの動作を決めるために非常に重要な情報である。本システムでは、障害物の凹凸といった形状も併せて検出することで、環境の情報を操縦者がより正確に把握できる。ここでは、最近点・形状の検出は 2 台の LRF それぞれで独立して行い、2 台の走査範囲が重なる部分についてはより近くに存在する方

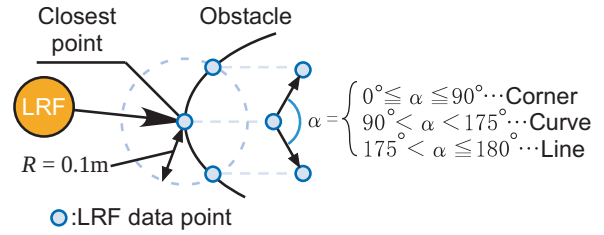


図 2 最近点付近の形状の検出

Fig. 2 Detection of the shape around the closest point

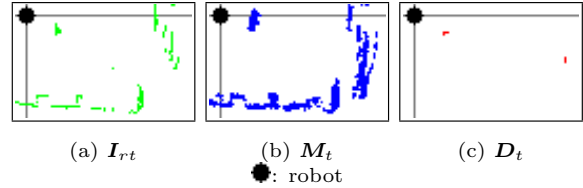


図 4 移動障害物の検出

Fig. 4 Detection of moving obstacles

を採用している。

最近点の検出は、単純に LRF の測距点列から最も近い距離に存在する点の距離と方向を取り出すことで行っている。

最近点付近の形状の検出は、図 2 に示すように、最近点とそこから距離 R にある 2 点へのベクトルが成す角 α によって分類して行う。また、凹凸の判定は、形状の検出結果が角 (corner) か曲線 (curve) である場合に行い、 α ($0^\circ \leq \alpha \leq 180^\circ$) がロボット側にある場合は凹、ロボットから遠い側にある場合は凸としている。

3.2 移動障害物の検出と追跡

移動障害物は、特にロボットに近づいてくるような場合には静止障害物以上に危険である。本システムでは、2 台の LRF の測距点列を画像化したもの (図 4(a)) を使用して移動障害物検出と検出した移動障害物毎の追跡を行い、その情報を操縦者にフィードバックする。追跡は KF によって各移動障害物の状態ベクトル

$$\mathbf{x}_{Ot} = (p_{xt}, p_{yt}, v_{xt}, v_{yt})^T$$

を推定することで行う。ここで、 (p_{xt}, p_{yt}) は測距点列画像上のピクセル位置 p_{Ot} 、 (v_{xt}, v_{yt}) は単位時間当たりのピクセル速度 v_{Ot} 、 t は現在の時刻ステップである。以下に 1 サイクルの手順を示す。

- (1) データ取得 現在の測距データ r_t とロボット位置姿勢 $\mathbf{p}_{Rt} = (x_{Rt}, y_{Rt}, \theta_{Rt})$ を取得し、画像化測距データ I_{rt} を生成する (図 4(a))。
- (2) 履歴の位置合わせ $i = 1, 2, \dots, 8$ について履歴 I_{rt-i} を $(\mathbf{p}_{Rt} - \mathbf{p}_{Rt-i})$ 移動し、更に 8 近傍方向に最大 8 回移動して微調整を行い、位置合わせして

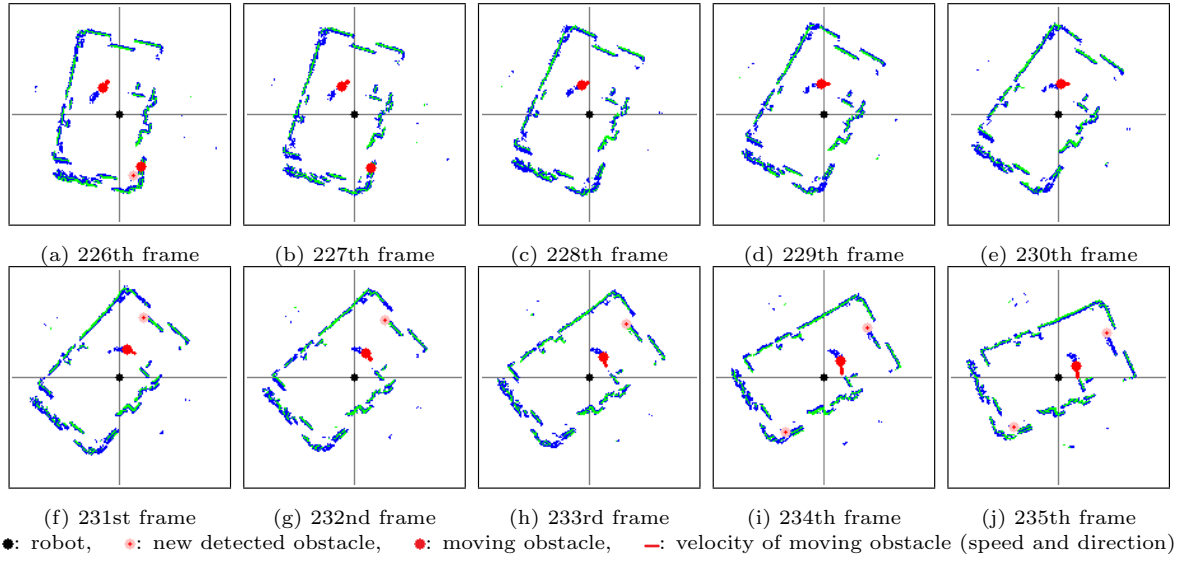


図 3 移動障害物の追跡の例

Fig. 3 Example of tracking of moving obstacles

調整済み履歴 I'_{rt-i} とする。

- (3) 地図の合成 I'_{rt-i} ($i = 1, 2, \dots, 8$) 全てを OR 演算で合成し、地図 M_t を作成する (図 4(b))。
- (4) 追跡中の障害物の位置合わせ 追跡中の障害物を $(p_{Rt} - p_{Rt-1})$ だけ移動する。
- (5) 移動障害物の検出 M_t を 8 近傍方向に最大 8 回移動して I_{rt} に対して位置合わせを行い、差分画像 $I_{rt} - M_t$ を生成する。この差分計算では、 I_{rt} にのみに存在する障害物ピクセルを $I_{rt} - M_t$ に残すことで、移動物体の過去の経路が残らないようにしている。次に $I_{rt} - M_t$ から、4 近傍連結で 3 ピクセル以上の領域のみを抽出した移動障害物画像 D_t を生成し、各領域それぞれの重心を移動物体として検出する (図 4(c))。
- (6) 移動予測 (KF の予測ステップ) 追跡中の各移動障害物について、等速直線運動モデル

$$\hat{x}_{Ot} = \begin{bmatrix} I & \Delta t I \\ 0 & I \end{bmatrix} x_{Ot-1} + q_t, q_t = \begin{pmatrix} 0 \\ q_{vt} \end{pmatrix}$$
 に従い移動予測を行う。ここで、 Δt は前回サイクルの処理時間、 q_t は移動モデルのノイズである。ここでは 1 サイクル内の速度変化を速度ノイズ q_{vt} によって扱い、その共分散行列は $Q_v = (8\Delta t)^2 I$ としている。

- (7) 予測と検出の結び付け (観測) 各移動予測結果について、観測モデル $h_{pt} = \hat{p}_{Ot} + r$ によって移動物体の位置の観測予測を得る。ここで、 r は観測ノイズであり、その共分散行列は $R = 1.5^2 I$ である。この観測予測に対して、KF の観測残差共分散行列の $\pm 3\sigma$ の範囲内に存在する最も近い移動障害

物の検出結果と結び付け、予測に対する実測として用いる。

- (8) 予測の修正 (KF の修正ステップ) 予測と検出が結び付けられたものだけに限り、KF の修正ステップの計算を行い、修正後の状態 x_{Ot} を得る。
- (9) 移動障害物の登録と削除 結び付けられなかった検出結果は新規移動障害物として登録し、次のサイクルから追跡される。このとき、KF の初期状態と初期共分散行列は、検出時の位置を p_0 としたとき、

$$x_{Ot} = \begin{pmatrix} p_0 \\ 0 \end{pmatrix}, P_{Ot} = \begin{bmatrix} 2^2 I & 0 \\ 0 & 8^2 I \end{bmatrix}$$
 を与えている。5 回連続で検出結果が結び付けられなかった予測結果は削除する。
- (10) 履歴更新 p_{Rt} と I_{rt} を履歴に加える。

図 3(a) ~ (j) に追跡の例を示す。この図では、緑色の点が I_{rt} を、青色が M_t を、赤色の丸印と直線は移動障害物と速度を表している。移動物体でない壁が移動障害物として追跡されているが、これらは誤検出であり、 I_{rt} と M_t の重ね合わせが不十分な時や、静止していた障害物が動き出した時に背後の壁が検出される時に起こる。これらはその後大きく動くことはなく、重大な問題とならない。実行のサイクルは 6Hz としている。

4. ベルト型インタフェース

本システムのベルト型インタフェースは、ロボット側の環境の情報を触覚の刺激によって表現し、同時にユーザの上体の姿勢によってロボットを制御する。

ベルトは、等間隔に配置された 16 個の振動モータ、

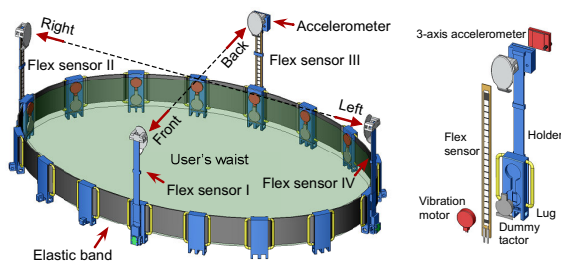


図 5 ベルト型インタフェース
Fig. 5 Belt interface

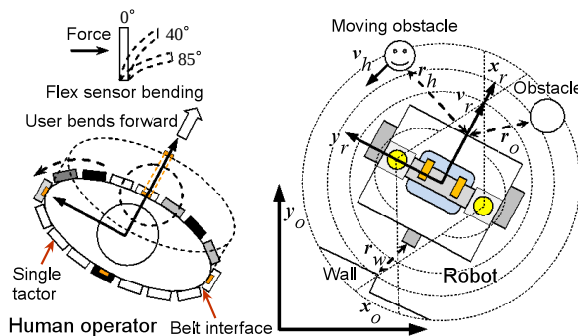


図 6 操縦者-ロボット間のインタラクション
Fig. 6 Operator-robot interaction

4 個の曲げセンサ, 1 個の 3 軸加速度センサと, プラスチック製のホルダをバンドで繋げたものであり (図 5), 腹部のサイズが異なっても調整可能なように設計した。振動モータは 2.5 ~ 3.5V 動作, 対応周波数 167 ~ 250Hz のコアレスモータであり, 等間隔に配置される。4 個の曲げセンサはユーザの腹部, 腰, 両脇腹に当たるように取り付けられており, これらによって, ユーザの上体の姿勢を測定する。また, 3 軸加速度センサによって垂直方向の加速度と体の方向を検出する。操縦者は, 上体をひねったり, 曲げたりすることで, ロボットの移動方向を変えることができる。移動速度は上体の曲げ角に応じて変化し, 直立すると滑らかに停止する。このインタフェースにより, 人間は, 自然で直感的でかつ安全なロボットの操縦を行うことができる。

ロボット側で処理された障害物の情報は, インタフェースに送られて, 障害物の距離・方向・形状や移動障害物の移動速度に応じて振動による刺激を与える。また, 振動モータは高速に振動させられるので, これを使って障害物の形状や移動障害物の表現を行う。例えば, 障害物がロボットの右にあるとの情報をロボット側から受け取ると, インタフェースの右側の振動モータを振動させ, 凸型の障害物があれば, 周辺 3 つの振動モータのうちの中央を両側よりも高い周波数で振動させる。また, 移動障害物はその移動方向に沿っ

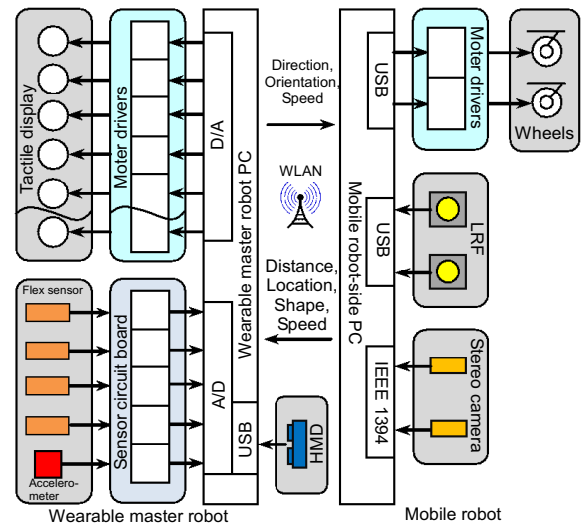


図 7 テレプレゼンスロボットシステムの構成
Fig. 7 Architecture of the telepresence robotic system

た振動モータを順次振動させる (図 6)。

ここで, 図 7 にベルト型インタフェースのより詳細な構成を含めたシステムの構成を示す。振動モータは, D/A 変換ボードからの信号によって制御されるモータドライバユニットに接続されており, インタフェース側の PC (wearable master robot) とロボット側 PC は無線 LAN による通信を行う。ロボットのカメラは環境の視覚的なフィードバックを得るためのものである。

5. 最後 に

本稿では, 移動ロボットの操作のための, ウェアラブルでポータブルな, また低電力で低コストなベルト型インタフェースを開発した。移動ロボット側の LRF での障害物検出では, 最近障害物とその形状の検出を, 移動障害物についてはカルマンフィルタを用いた追跡を行った。

このようなインタフェースの応用範囲として, 現在, 移動ロボットの操作はもちろん, 電動車椅子のナビゲーションや, 理学療法分野, インタラクティブなゲームなどを考えている。

参 考 文 献

- 1) Mori, T., Sato, T., Noguchi, H., Simosaka, M., Fukui, R. and Sato, T.: Moving Objects Detection and Classification Based on Trajectories of LRF Scan Data on a Grid Map, *Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp.2606-2611 (2010).