

画像ポインティングによる不整地移動ロボットの遠隔操縦システムにおける天井計測に基づく到達精度の向上

○ 田村 祥*, 前山 祥一*, 岡田 佳都**, 永谷 圭司**, 吉田 智章***, 渡辺 桂吾*
*岡山大学, **東北大学, ***千葉工業大学

Arrival Accuracy Improvement for Teleoperated Mobile Robots on Uneven Ground by Image Pointing

○ Sho TAMURA*, Shoichi MAEYAMA*, Yoshito OKADA**, Keiji NAGATANI**
Tomoaki YOSHIDA*** and Keigo WATANABE*
*Okayama Univ., **Tohoku Univ., ***Chiba Inst. of Tech.

Abstract: Our study is to teleoperate mobile robots on uneven ground by image pointing. This paper proposes a method for improving the arrival accuracy of robots by modifying the 3D localization with the measurement of the ceiling in the building.

1 はじめに

阪神淡路大震災以降、レスキューロボットの開発が盛んに行われるようになった。近年では、化学プラント事故、臨界事故およびNBCテロなどの迅速な対処を必要とする災害現場において、救助隊員の二次災害のリスク軽減、人命救助、事故の被害拡大防止を目的としたレスキューロボットの開発が行われている。このような背景のもと、複数の高速移動ロボットを遠隔操縦し、被災前の環境が既知である地下街内部に侵入させることにより、迅速に内部状況を把握することを目的とした被災建造物内移動RTシステムの開発プロジェクトが発足し、本研究もこのプロジェクトに参画している。

レスキューロボットの操縦インタフェースは、ジョイスティックやゲーム用コントローラが用いられることが多い。これらの操縦インタフェースは、高い操作性が期待できるが、操作量が多く操縦に専念する必要がある上、操作対象の動力学的特性を訓練により習得する必要がある。これに対して、Fig. 1に示す画像ポインティングを用いた操縦インタフェースは、簡単に操作量が少なくオペレータの負担が少ない。そのため、ロボットの操縦以外の情報収集や救援活動などの作業に労力を割くことが可能となり、レスキューロボットの操縦インタフェースに画像ポインティングを用いることは非常に有用であると考えられる。

移動体の操縦インタフェースに画像ポインティングを用いた研究はこれまでも行われているが、対象とする環境を、平らに舗装された路面、もしくは、移動体の大きさに対して路面の起伏は十分小さいと仮定しており、環境が不整地と予想される災害現場では適用範囲は限られていた。そこで、筆者らは、不整地に適応させるために、オペレータがポイントした画像上での位置から「目標ベクトル」として走行経路を与える手法を提案し、これと三次元オドメトリと組み合わせることで、未知の起伏面においても目標地点へ到達可能な遠隔操縦システムを実現した¹⁾。しかしながら、従来手法では、ロボットの高さ位置の精度が目標地点への到達精度に多大な影響を与えるという問題があっ

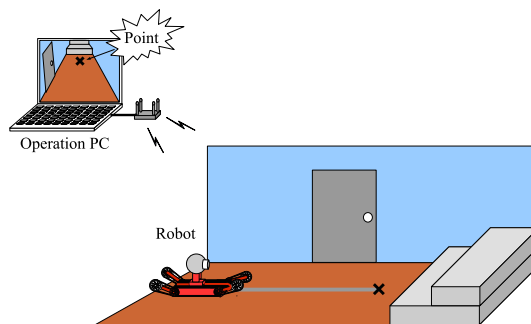


Fig. 1: Teleoperation of a robot by image pointing GUI

た。したがって、到達精度向上のためには、内界センサのみで推定した三次元オドメトリでの累積誤差を修正し、ロボットの高さ位置の精度向上が必要不可欠となる。

そこで本研究では、建造物内の天井計測により高さ位置を推定し、三次元オドメトリの累積誤差の修正を行うことで、画像ポインティングを用いた遠隔操縦システムの到達精度の向上を目指す。本稿では、拡張カルマンフィルタを用いた天井計測に基づく自己位置推定法を提案し、検証実験を行ったので報告する。

2 画像ポインティングによる不整地移動ロボットの遠隔操縦システム

Fig. 1に示すように三次元オドメトリが可能なロボットと操作用PCから構成される。まず、ロボットに搭載されたカメラから周囲の環境情報を獲得し、操作用PCに送信する。操作用PCでは、獲得した画像情報をもとにGUI画面を作成し、オペレータに提示する。オペレータは、提示されたGUI画面上で操作する。

具体的には、ロボットの前方の環境が映し出されているカメラ画像上で、移動目標位置を直接ポイントす

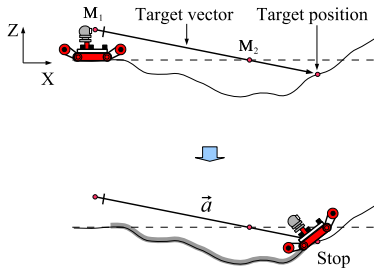


Fig. 2: Proposed method

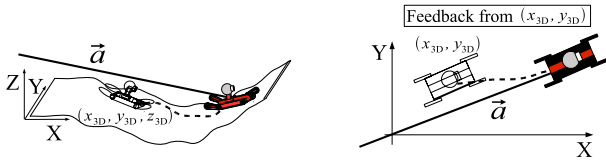


Fig. 3: Line following on X-Y coordinate plane

ることで、ロボットに移動指示を与える。カメラ画像上のオペレータの指示位置を画像座標系から、世界座標系における整地上の座標位置 M_2 へ座標変換する。そして、既知であるカメラの位置 M_1 から M_2 へ向けたベクトルを導出し、これを「目標ベクトル」とする (Fig. 2)。目標ベクトル導出後、ロボットを目標ベクトルに向けて走行させる。目標地点への誘導には、目標ベクトルとロボットの三次元オドメトリを用いて行い、ロボットを目標地点へと到達させる。本節では、目標ベクトルの導出、目標地点への誘導制御、目標とする到達精度について述べる。

2.1 目標ベクトルの設定

不整地において、ロボットの遠隔操縦を行う際は、高さ成分を含む目標地点を設定する必要がある。しかしながら、カメラ画像からは目標地点の高さ成分を求めることができない。そこで、本研究では、目標地点をベクトルで表現することにより、高さ成分を含ませる。このベクトルを「目標ベクトル」 \vec{a} と呼び、既知であるカメラ位置と、整地上の目標地点との位置関係から導出する¹⁾(Fig. 2)。

2.2 目標地点への誘導制御

二次元の走行制御系と三次元の自己位置推定を用いて、不整地において目標地点へと誘導する。本研究では、二次元の走行制御計の中でも、直線追従走行を用いる。目標ベクトル \vec{a} を x - y 平面上に投影した直線を追従走行させる。フィードバック制御に用いる二次元の自己位置推定値 (x, y) に、三次元の自己位置推定値 (x_{3D}, y_{3D}, z_{3D}) の (x_{3D}, y_{3D}) を渡すことで x - y 平面上での直線追従を可能とし、目標地点へと誘導する (Fig. 3)。

2.3 到達判定法

目標地点到達判定には、目標ベクトルと三次元の自己位置推定値を用いる。目標ベクトルを目標地点到達

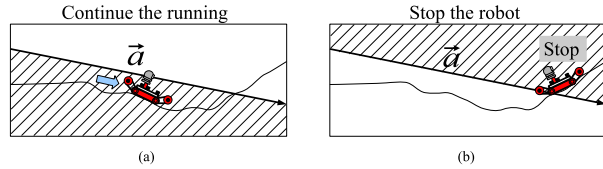


Fig. 4: Outline of arrival judgement

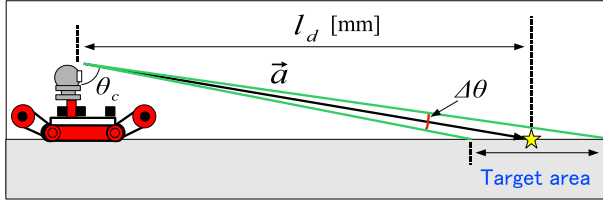


Fig. 5: Target arrival accuracy

の境界とみなし、 x - y - z 空間を走行領域と停止領域に分ける。ロボットが走行領域内に位置する場合は走行を継続し、停止領域内に到達するとロボットを停止する (Fig. 4)。オペレータが移動指示を与える際に GUI 画面上に見えている地面は、走行環境内において目標ベクトルと交わる一番手前の地面である。したがって、最初に境界面を越える位置がオペレータの指示位置であることがわかる。また、境界面で到達判定を行うことで、ロボットが到達目標の近傍を通らない場合であっても判定可能となる。

2.4 目標とする目標地点への到達精度

画像ポインティングによる遠隔操縦システムでは、オペレータがカメラ画像上をポイントすることで、目標地点を指示する。詳細を述べると、指示されたカメラ画像上の 1 点を世界座標系に変換して、整地上における目標地点とする。そのために、カメラ画像上においてオペレータが指示した 1 画素が占める領域にロボットが停止すれば、目標とする到達精度に達したと考えられる (Fig. 5)。1 画素が占める角度を 0.192 [deg] と想定すると、カメラ画像上の 1 画素辺りが占める領域は、カメラから目標地点までの距離の二乗に対して 0.6% の範囲であり、この範囲にロボットを停止させることを目標とする。ここで、カメラから目標地点までの距離を l_d [mm]、カメラの地面に対する設置角度を θ_c 、1 画素が占める角度を $\Delta\theta$ とする。

3 天井計測に基づく到達精度の向上

前節で述べた到達判定法では、高さ位置の精度が目標地点への到達精度に多大な影響を与える。目標地点への到達精度向上のために、内界センサのみで推定した三次元オドメトリでの累積誤差を修正し、ロボットの高さ位置の精度向上が必要不可欠となる。そこで本研究では、想定環境である建造物内の天井計測に基づく自己位置推定を行い、目標地点への到達精度の向上を目指す。本節では、天井計測に基づく高さ位置推定と、拡張カルマンフィルタを用いた自己位置推定法について述べる。

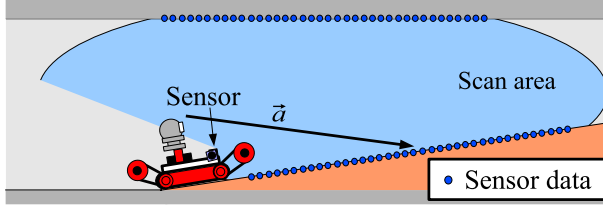


Fig. 6: Ceiling measurement by scanning the vertical plane

3.1 鉛直面スキャンによる天井計測

想定している環境は建造物内であり、天井の存在が期待される。天井は、走行路面と異なり障害物等の存在も考慮する必要がなく、凹凸の少ない平面であることが予想される。そのために、走行路面よりも天井を計測することが容易で、ロボットの高さ位置を推定しやすい。そこで、Fig. 6に示すように距離センサを用いて鉛直面スキャンにより建造物内の天井を計測することで高さ位置を推定する。前章で述べたように、ロボットの予想走行経路が x - y 平面上に投影した「目標ベクトル」であり、この投影した直線の鉛直面を測定することでロボットの高さが推定可能と考えられる。

鉛直面スキャンの利点としては、1 スキャン (短時間) で天井計測可能であり、高速移動時にも高さ位置推定が可能となる点が挙げられる。また、「目標ベクトル」とロボット前方の環境情報を組み合わせることで、天井計測だけではなく、目標地点の三次元座標の推定、ロボット位置から目標地点までの走行路面の地面形状認識が可能となる。

3.1.1 ハフ変換による高さ位置推定

鉛直面スキャンにより獲得した天井計測情報を基にハフ変換を行い、検出された直線 l_c を天井と認識することで、距離センサの高さ位置 z_s を推定する (Fig. 7)。直線検出にハフ変換を用いた理由として、最小二乗法に比べて凹凸にロバストに直線を検出可能である点が挙げられる。なお、ロール角が 0 に近い際に高さ位置推定を行うこととし、ロール方向の回転は考慮せずにピッチ角のみを考慮する。

3.1.2 ロボットモデルによる高さ位置推定

前節で述べた高さ位置の推定手法では、距離センサの高さ位置が検出可能である。そこで、Fig. 7に示すように、既知である天井の高さ h_c 、天井計測により推定した距離センサの高さ位置 z_s と、距離センサの配置位置 $(x, z) = (l_s, h_s)$ 、ロボットのピッチ角 θ からロボットの高さ位置 h_r を推定する。

$$h_r = h_c - z_s - (l_s \sin \theta + h_s \cos \theta) \quad (1)$$

3.2 拡張カルマンフィルタを用いた天井計測に基づく自己位置推定

三次元空間内の位置推定を行う研究は盛んに行われており、岡田ら²⁾は、三軸ジャイロで計測したロボッ

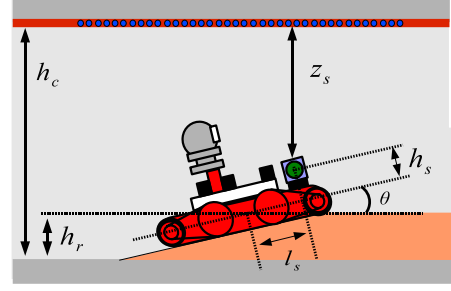


Fig. 7: Estimation of the robot height

ト本体周りの角速度に基づくクォータニオンを用いて姿勢を推定し、三次元の自己位置推定を実現した。しかしながら、内界センサのみで推定した三次元オドメトリでは、長距離移動や不整地移動時に誤差が累積していく問題がある。また、前節で述べた到達判定法では、高さ位置の精度が目標地点への到達精度に多大な影響を与えるという問題がある。そこで、前節で述べた天井計測により推定したロボットの高さ位置を用いて三次元オドメトリを修正する。高さ位置情報と三次元オドメトリの融合には拡張カルマンフィルタを用いる。

ある時刻 n において、三次元空間内におけるロボットの位置と姿勢は、ベクトル $P[n] = (x[n], y[n], z[n], \alpha[n], \beta[n], \gamma[n])^T$ で表現可能である。 $x[n], y[n], z[n]$ はロボットの位置を表し、 $\alpha[n], \beta[n], \gamma[n]$ はヨー角、ピッチ角、ロール角を表している。また、ロボットの位置と姿勢を表す $P[n]$ はサンプリングタイム τ 毎に式 (2) の様に更新される。ここで、 V は速度、 $\omega_{\alpha/\beta/\gamma}$ はそれぞれ α, β, γ の角速度を表す。このときの誤差分散である $\Sigma_P[n]$ は式 (3) を用いて計算可能である。ここで、 $J[n]$ は $P[n]$ の $x[n], y[n], z[n], \alpha[n], \beta[n], \gamma[n]$ に関するヤコビアン、 $K[n]$ は $P[n]$ の $V, \omega_{\alpha}, \omega_{\beta}, \omega_{\gamma}$ に関するヤコビアン、 Σ_m は移動量の誤差分散、 Σ_N は計算の丸めの誤差等の微小な誤差の誤差分散を表す。

$$P[n + \tau] = P[n] + \begin{pmatrix} V \cos \alpha[n] \cos \beta[n] \\ V \sin \alpha[n] \cos \beta[n] \\ -V \sin \beta[n] \\ \omega_{\alpha} \\ \omega_{\beta} \\ \omega_{\gamma} \end{pmatrix} \tau \quad (2)$$

$$\Sigma_P[n + \tau] = J[n] \Sigma_P[n] J[n]^T + K[n] \Sigma_m K[n]^T + \Sigma_N \quad (3)$$

天井計測に基づく高さ位置推定後に、以下の様に三次元位置を修正する。

$$P_m[n] = P[n] + \Sigma_f[n] H^T \Sigma_{z_s}^{-1} (z_s - z[n]) \quad (4)$$

$$\Sigma_f[n] = (\Sigma_P[n]^{-1} + H^T \Sigma_{z_s}^{-1} H)^{-1} \quad (5)$$

ここで、天井計測により推定した高さ位置 z_s 、 $P_m[n]$ は天井測定によって修正された推定自己位置、 $\Sigma_f[n]$ は修正後の誤差分散を表す。また、今回は天井計測によりロボットの高さ位置のみを推定可能とする。そのため、観測器を $H = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$ のように設定する。

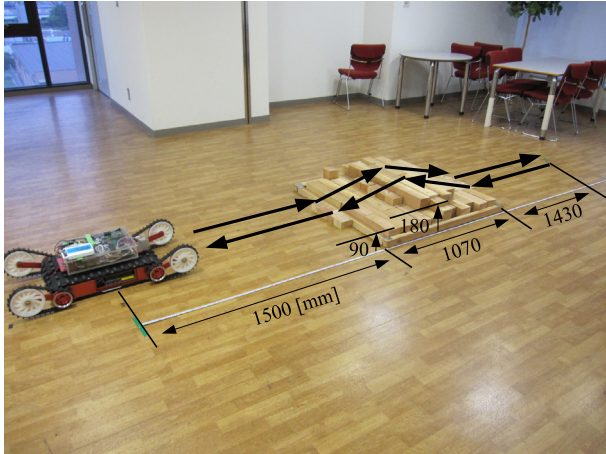


Fig. 8: Environment of the experiment

4 検証実験

本節では、第3節で提案した拡張カルマンフィルタを用いた天井計測に基づく自己位置推定の有用性を検証するために、模擬環境において提案手法と三次元オドメトリ²⁾の位置推定精度を比較評価したので報告する。次節より、実験概要、実験結果と考察について述べる。

4.1 実験概要

Fig. 8に示すように、岡山大学総合研究棟5F共有スペースに段差を含む模擬環境を作成し、クローラロボット「Kenaf」を用いて初期位置(0 [mm], 0 [mm], 0 [mm])から目標地点(4000 [mm], 0 [mm], 0 [mm])までを3往復させた。段差は2段で180 [mm]であり、段差の上り下りの際には、特にフリッパーアームの制御は行っていない。「Kenaf」の走行速度は20 [cm/s]程度とし、150 [ms]毎に拡張カルマンフィルタによる天井計測に基づく自己位置推定を行った。また、天井の高度は既知(2700 [mm])であり、天井計測には測域センサ(URG-04LX)を用いた。

4.2 実験結果

Fig. 9, Fig. 10に三次元オドメトリ、拡張カルマンフィルタを用いた天井計測に基づく自己位置推定の軌跡を示す。三次元オドメトリは3往復させた後に、x軸方向に-127 [mm]、z軸方向に457 [mm]の誤差が発生した。それに対して、拡張カルマンフィルタを用いた天井計測に基づく自己位置推定を行った結果、x軸方向に-129 [mm]、z軸方向に-20 [mm]の誤差が発生した。提案手法による自己位置推定の誤差を、三次元オドメトリと比較すると、z軸方向の誤差が約4%以内に収まっている。

4.3 考察

目標地点への到達精度について、提案手法の実験結果を用いて考察を行う。今回の模擬環境では、目標地点までの距離は4000 [mm]であるために距離方向で最大±48 [mm]、高さ方向で最大±8.5 [mm]以内の

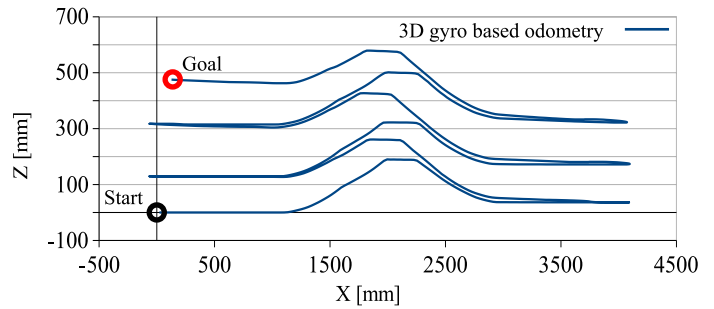


Fig. 9: Trajectory of 3D gyro based odometry

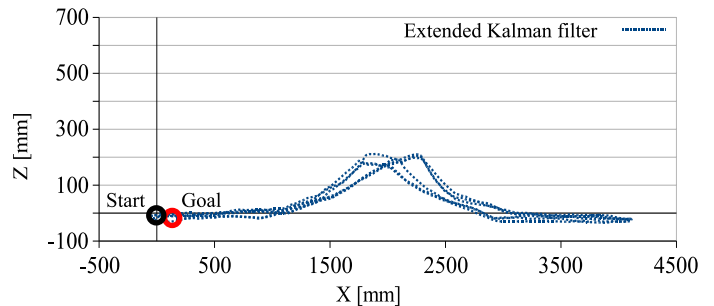


Fig. 10: Trajectory of extended Kalman filter

領域に自己位置推定の誤差が収まれば、目標とする到達精度に達したと考えられる。しかしながら、Fig. 10に示すように高さ方向で-20 [mm]の誤差が発生しており、目標とする到達精度に達していない。本実験では、ロール角に依らず全ての天井観測データを用いて位置修正を行ったため、その影響もあると考えられる。また、天井測定の誤差に大きく影響を受けており、今後は天井測定だけではなく地面形状認識による自己位置推定を行い、到達精度の向上を目指したい。

5 まとめと今後の課題

本稿では、画像ポインティングによる遠隔操縦システムの到達精度向上のために、天井計測に基づく自己位置推定法を提案した。また、検証実験により、提案手法の有用性を示した。今後は、ロール角を確認して、0に近い際に位置修正を行うことで、改善を試みる。また、天井計測だけではなく、路面形状計測を行って更なる自己位置推定の精度改善を行い、画像ポインティングによる到達精度向上を目指したい。

謝辞

本研究の一部は、NEDO「戦略的先端ロボット要素技術開発プロジェクト」により実施されたことを記す。

参考文献

- 1) 田村, 前山: 画像ポインティングによる不整地移動ロボットの遠隔操縦における目標ベクトルを用いた経路誘導と到達判定法の提案, 計測自動制御学会論文集, Vol. 45, No. 3, 183/189 (2009)
- 2) 岡田, 永谷, 吉田: 複数センサの融合によるクローラ型ロボットの3次元自己位置推定, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'08講演論文集, 2P2-C18, (2008)