

移動ロボットの自己位置推定への利用を目的とした速度センサの性能の評価

○鈴木大貴(東北大学), 山内元貴(東北大学), 永谷圭司(東北大学)

Evaluation of the performance of the velocity sensor for localization of mobile robots

○Daiki SUZUKI(Tohoku Univ.), Genki YAMAUCHI(Tohoku Univ.), Keiji NAGATANI(Tohoku Univ.)

Abstract : This paper proposes a sensor fusion technique using Particle Filter as stubborn localization estimate technique for the sliding of the crawler type mobile robot. In addition, we performed the performance examination of the velocity sensor which is necessary for this suggestion technique and evaluated usefulness and precision. As a result of performance examination, we understood that the velocity sensor has the performance that use for proposal technique.

1 緒言

災害現場や事故現場など、人の侵入が困難な屋外環境において、環境情報の獲得や要救助者の探査を、人に代わって行うことを目的としたクローラ型移動ロボットが開発されている。このような環境における、移動ロボットによる探査では、遠隔操縦によるものが多い。遠隔操縦を行うオペレータは、移動ロボットを走行させ、要救助者や重要な情報をカメラなどのセンサで発見し、対象物の位置を把握する。そのため、移動ロボットの自己位置推定機能は非常に重要である。

クローラ型移動ロボットの自己位置推定として用いられている手法の1つに、オドメトリがある。この手法は、走行輪の回転量を計測することで移動速度、旋回速度を算出し、これを積分することで自己位置を推定するものである。しかし、移動速度を積分して自己位置を求めるため、クローラと接地面との滑りによる位置推定誤差が累積することで誤差が経時的に増大するという問題がある。特に、クローラ型移動ロボットにおいては、旋回時にクローラと接地面との間に、必ず滑りが生じるという特性がある。そのため、クローラ型移動ロボットが自己位置推定を行う上で、走行時の滑りに対して頑強な自己位置推定手法を構築することは重要である。そのような、滑りに対して頑強な自己位置推定手法として、オドメトリとGPSの情報を、パーティクルフィルタを用いて融合する手法の有効性が示されている[1]。この手法には、GPSの情報が信頼できる、屋外の上空が開けた場所でのみ適用することができないという問題がある。

移動ロボットが移動する路面の状況に影響されにくく、環境情報を予め取得しておく必要のない、滑りに対して頑強な自己位置推定手法として、ビジュアルオドメトリという手法がある。ビジュアルオドメトリはビジョンセンサを用いて、画像列から移動ロボットの運動を推定し、初期位置からの移動距離を求める手法である。この手法の問題点として、画像を扱うため処理が複雑になり、計算時間が多く掛かってしまうという問題がある[2]。一方、高周期で値が得られる速度センサとして、永井らによって非接触型速度計測装置(以降、速度計測装置)が開発されてきた[4]。速度計測装置は、レーザと光学マウスに用いられる光学センサを応用したもので、移動ロボットの自己位置推定に用いることが可能である。しかしながら、この装置単体では、まれに計測値に外れ値が含まれるため、本研究では、位置推定誤差が発生することがわかっている。そこで、パーティクルフィルタを用いて、オド

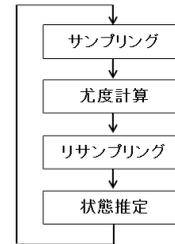


Fig. 1: Particle filter algorithm

メトリと速度計測装置の情報を融合させ、それぞれの問題を解決することを検討する。

本研究では、パーティクルフィルタを用いて、オドメトリと前述の速度計測装置の情報を融合した、滑りに対して頑強な自己位置推定手法を提案する。さらに、その提案手法をクローラ型移動ロボットに実装するために、速度計測装置が十分な性能を持っているかを評価したので、本稿にて、その結果を報告する。

2 提案する自己位置推定手法

本章では、パーティクルフィルタを用いた自己位置推定手法について説明する。パーティクルフィルタとは、推定対象の状態遷移確率と観測値が与えられていることを前提として、対象の状態を推定するために用いられるフィルタの一種である。本研究では、エンコーダから算出した移動ロボットの速度を推定対象とし、速度計測装置によって得られた移動ロボットの速度を観測値として用いる。本研究におけるパーティクルフィルタでは、移動ロボットの速度の真値の確率分布をパーティクルによって表現する。各パーティクルは、移動ロボットの速度の情報を持っている。そこで、各パーティクルに対して確からしさ(尤度)を計算し、その尤度に基づいて現在の状態を推定する[5]。ここで、パーティクルフィルタのアルゴリズムの概要を説明する。Fig. 1に、本研究におけるパーティクルフィルタのアルゴリズムを示す。サンプリングにおいては、走行輪の回転角速度より算出した移動ロボットの速度に誤差を与える。次に、速度計測装置によって移動ロボットの速度を取得し、その情報を基に各パーティクルの尤度を計算する。尤度とは、各パーティクルの確からしさに関する確率変数であり、各パーティクルがどれだけもっともらしいかを表す。次に、リサンプリングにおいては、計算した尤度を出現頻度としてパーティクルを再分配する。最後に状態推定として、各パー

ティクルの平均速度を現在の移動ロボットの推定速度として算出する．このようにして算出した移動ロボットの速度を基に，式(1)に従ってオドメトリを用い，移動ロボットの自己位置推定を逐次行うことが可能である．

$$\mathbf{x}_t = \int \mathbf{v}_t dt \quad (1)$$

ここで， \mathbf{x}_t は時刻 t における移動ロボットの自己位置であり， \mathbf{v}_t は，時刻 t における i 番目のパーティクルの速度 $\mathbf{v}_{p,t}^{[i]}$ の平均である． $\mathbf{v}_t^{[i]}$ を式(2)に示す．

$$\mathbf{v}_t = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \mathbf{v}_{p,t}^{[i]} \quad (2)$$

2.1 状態遷移モデル

パーティクルフィルタでは，取得したセンサ情報に誤差が含まれていることを前提として誤差のモデルを立て，状態が遷移する際に，そのモデルを基にした状態遷移モデルを扱う．本研究では，走行輪の回転角速度から算出する速度を基にして状態遷移モデルを扱う．算出した速度に対し，正規分布に従う誤差を与え，それを積分して速度に変換することによって，推定対象である移動ロボットの速度に誤差を与える．これを踏まえ，本研究では，式(3)に示すように移動ロボットの速度に誤差を与え，状態遷移モデルとする．

$$\mathbf{v}_{p,t}^{[i]} = r\omega + \mathbf{v}_e^{[i]} \quad (3)$$

ここで， r は走行輪の半径， ω は走行輪の回転角速度である．また， $\mathbf{v}_e^{[i]}$ は i 番目のパーティクルの速度における誤差であり，正規分布に基づいて与えられる．

2.2 尤度関数

パーティクルフィルタでは，状態遷移後に各パーティクルが，どの程度確からしいかを評価する尤度関数を設計する必要がある．本研究では，算出した速度の誤差や，観測値として用いる速度計測装置によって取得する速度の誤差が，正規分布に従っていると仮定し，尤度 $w_t^{[i]}$ を計算するための尤度関数を式(4)のように設計した．

$$w_t^{[i]} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{(d_{p,t}^{[i]})^2}{2\sigma^2}\right) \quad (4)$$

ここで， $d_{p,t}^{[i]}$ は時刻 t における i 番目のパーティクルの速度と観測値との差分， σ は観測値の誤差の標準偏差である．

Table. 1: Specifications of velocity sensor

使用デバイス	
光学センサ	Avago ADNS-6010
レーザ光源	LM-101-A2
マイコン	GR-SAKURA
バンドパスフィルタ	O-BPF650
諸元	
位置分解能	0.0081145 [cm/count]
最大出力レート	100 [Hz]
消費電力	5 [V], 0.12 [A]

2.3 リサンプリング

各パーティクルは，状態遷移モデルに基づいて次の状態に遷移する．遷移後，観測値との差分より，式(4)の尤度関数によって尤度が計算される．この際，尤度が定めた閾値よりも小さいパーティクルについては情報を全て消去し，消去したパーティクルの数だけ尤度の大きいパーティクルから選び直し，複製する．これをリサンプリングという．本研究ではリサンプリング手法として等間隔リサンプリングを用いた[6]．

3 速度センサ

次に，本研究において用いる速度計測装置について説明する．速度計測装置は，永井らによって開発された速度センサであり，光学式マウスの仕組みを応用している[3]．速度計測装置の諸元をTable. 1に示す．速度計測装置の計測原理は，光学センサによる，レーザスペckルの画像追跡に基づく．レーザスペckルとは，物体の表面で反射したレーザ光の干渉によって生じる，斑点状の不規則な模様のことである．ここで，光学センサによる，レーザスペckルの画像追跡について詳しく説明する．レーザの反射光において，反射光の位相が揃う場所と揃わない場所が生じる．反射光の位相が揃っている点は反射光同士の干渉によって明るく，揃っていない点は暗くなり，このような反射光が画像センサへ入射することにより，レーザスペckルは観察される．光学センサの受光部は 30×30 の画素センサとなっており，計測面から反射したレーザ光から生じるレーザスペckルパターンが受光部で撮影される．速度計測装置は，移動前後のレーザスペckルパターンの画像を用いて移動量を算出することにより，装置本体の移動量を計測することができる．そして，計測した移動量と計測時間を基に，速度を算出することができる．

また，レーザスペckルは空間上に無数に生じるため，レーザスペckルおよびその移動は，計測面から離れた位置でも観測することができる．そのため，レーザ光の減衰を無視すれば，原理上，速度計測装置に計測面からの高さの依存性は無い．しかし，本研究で使用した速度計測装置は太陽光などの環境照度対策として，光学センサの治具を設計しているため，その設計上の制限により，計測することのできる高さに制限が生じる．

3.1 SQUAL値

速度計測装置に搭載されている光学センサADNS-6010(Avago製)は，SQUAL値(Surface Quality値)と呼ばれる，レーザ照射面の状態を表す指標を出力する．SQUAL値は，現在のフレームにおいて，光学センサで見ることができる有効な特徴の数の1/4の値である．この値は，経験的には条件が良好なとき120前後を示し，30を下回ると移動量の出力は止まる[4]．また，暗い環境や単一色の面など，輝度の変化に乏しい場合，SQUAL値が0に近くなり，レーザスペckルを正常に検知することができないことが知られている[7]．

4 速度センサの評価

本研究では，速度計測装置が，提案手法を実現させるために十分な性能を持っているかどうかを検証するため，スライドアクチュエータにより構成した試験装置を用いて，速度計測装置の評価試験を行った．評価試験では，計測面，速度計測装置の高さ，スライドアクチュエータの速度

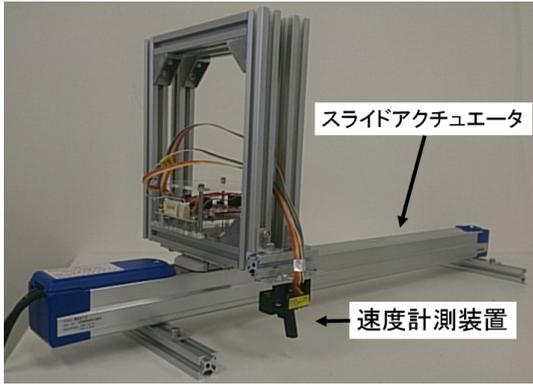


Fig. 2: Experimental device



Fig. 3: Experimental gravel

の3種類の条件を変化させ、それらの条件が速度計測装置の計測する速度およびSQUAL値にどのように影響するかを評価した。さらに、速度計測装置の、高さ方向の変化に対する性能を確認するための検証試験を行った。検証試験では、ステップフィールドを用いることで、急激に高さ方向の変化が生じる環境を再現し、その環境において速度計測装置の計測する速度およびSQUAL値にどのように影響するかを検証した。スライドアクチュエータの諸元をTable. 2に、製作した試験装置の外観をFig. 2に示す。

4.1 速度計測装置の精度評価試験

速度計測装置の性能を評価するため、複数の条件下で、速度計測装置の計測した速度と、スライドアクチュエータの指定した速度を比較する評価試験を行った。複数の条件をまとめた表をTable. 3に示す。なお、2種類の砂利については、紙の上に敷き詰めした後、平板を用いて均し、可能な限り起伏が生じないようにした。評価試験に使用した砂利をFig. 3に示す。また、評価試験では、Table. 3に示した3種類の条件をそれぞれ変化させ、計27通りの条件を用いた。また、それぞれの条件について3回ずつ評価試験を行った。

評価試験の結果をTable. 4に示す。これらの表は、スライドアクチュエータの速度および速度計測装置の高さを変化させた際の、速度計測装置が計測した速度およびSQUAL値の平均値を表している。速度については、スライドアクチュエータの速度との誤差の割合を表しており、SQUAL値については、絶対値を表している。よって、表の速度の割合を表す値が0に近いほど、速度計測装置の計測値と速度の真値が近く、SQUAL値が小さいほど、その計測は

Table. 2: Specifications of slide actuator

繰返し位置決め精度	$\pm 2 \times 10^{-3}$ [cm]
最大可搬質量	6 [kg]
ストローク	50.0 [cm]
最高速度	60.0 [cm/s]

不確かであるということを示している。これらの表から分かるように、いずれの計測面においても、スライドアクチュエータの速度が大きいほど、また、速度計測装置の高さが大きいほど、誤差の割合が大きくなる傾向がある。また、誤差の割合の絶対値が大きいほど、SQUAL値が小さくなること分かる。よって、速度計測装置をクローラ型移動ロボットに搭載し、提案手法を実装することを考えると、SQUAL値を尤度関数に取り入れ、速度計測装置の計測する速度の確からしさを推定することが可能であると考えられる。

しかし、Table. 4の速度10 [cm/s]の列に注目すると、測定面が砂利の場合かつ、高さが10 [cm]の場合、誤差が非常に大きくなっていることが分かる。また、暗い色の砂利で、速度10 [cm/s]の場合の結果について、Fig. 4に示す。この図は、スライドアクチュエータが動き出した時間を0 [s]とし、スライドアクチュエータが停止するまでの、速度計測装置が計測した速度と、計測したSQUAL値をプロットしている。また、高さの条件は左から1 [cm], 5 [cm], 10 [cm]となっている。さらに、3個のグラフにおいて、時間が3 [s]以降に速度が0 [cm/s]になっているのは、時間が3 [s]のときにスライドアクチュエータが停止したことが理由である。Fig. 4(c)から分かるように、高さが10 [cm]の場合はSQUAL値が常に80を下回っており、速度も0 [cm/s]付近で、正しい値を全く出力することができていない。また、Fig. 4(a)およびFig. 4(b)より、高さが1 [cm]および5 [cm]の場合を比べると、高さが5 [cm]の

Table. 3: Condition of accuracy evaluation

計測面		
机の上面	明るい色の砂利	暗い色の砂利
速度計測装置の高さ [cm]		
1	5	10
スライドアクチュエータの速度 [cm/s]		
10	30	60

Table. 4: Result of velocity sensor's value

error[%]	SQUAL	速度 [cm/s]					
(desk)		10	30	60			
高さ [cm]	1	-0.763	125	-12.4	117	-19.6	110
	5	1.79	132	-2.92	122	-4.64	120
	10	-8.72	109	-32.1	96.4	-87.4	92.3
error[%]	SQUAL	速度 [cm/s]					
(bright gravel)		10	30	60			
高さ [cm]	1	-7.02	118	-21.1	104	-81.4	97.3
	5	-11.9	108	-46.7	104	-91.9	86.9
	10	-68.2	61.3	-99.1	43.9	-95.9	45.4
error[%]	SQUAL	速度 [cm/s]					
(dark gravel)		10	30	60			
高さ [cm]	1	-8.44	114	-28.0	99.1	-88.7	90.3
	5	-11.5	100	-88.7	74.1	-94.3	65.4
	10	-97.6	23.0	-99.8	19.5	-99.0	21.9

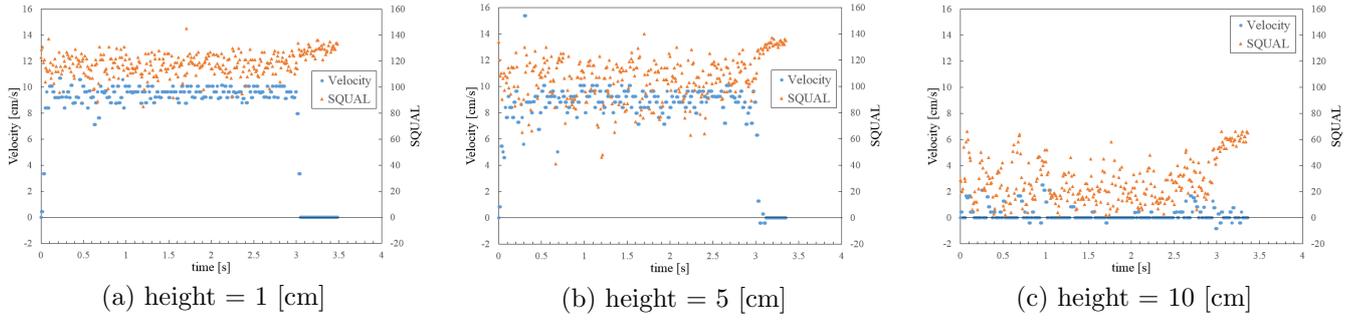


Fig. 4: Details of the result, dark gravel, velocity = 10 [cm/s]

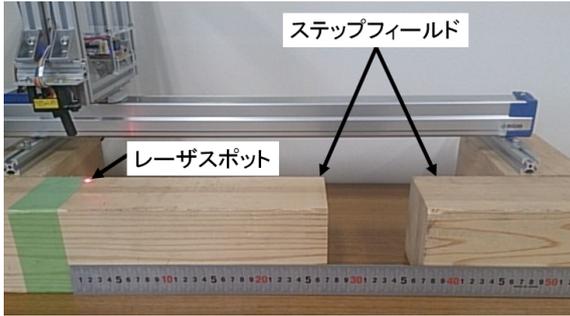


Fig. 5: Experimental device with a step

場合の方が速度およびSQUAL値がばらついていることが分かる。よって、高さが10 [cm]の場合は全く正しい値を出力することができていないため、提案手法に利用することができないと考えられる。しかし、高さが1 [cm]および5 [cm]の場合であれば、SQUAL値を監視し、0.1 秒間SQUAL値が100 以上であればその時の速度を確からしいものとして扱うといった規定により、提案手法に利用することができると考えられる。

4.2 速度計測装置の高さ方向の変化に対する検証試験

前節の結果を受け、速度計測装置が計測している際、速度計測装置の高さが急激に変化する場合の、速度計測装置の計測する速度について、検証試験を行った。検証試験では、Fig. 5に示すように、試験装置の他に高さ10 [cm]のステップフィールドを用いた。検証試験の条件をまとめた表をTable. 5に示す。この表は、特定の計測地点における、速度計測装置の高さおよびスライドアクチュエータの速度を表している。

検証試験の結果をFig. 6に示す。Fig. 6は、スライドアクチュエータが動き出した時間を0 [s]とし、スライドアクチュエータが停止するまでの、速度計測装置が計測した速度と、計測したSQUAL値をプロットしている。ここで、Fig. 6より、速度計測装置が計測した速度に注目する。Fig. 5と比較すると、速度計測装置の高さが5 [cm]の地点において、速度計測装置が計測した速度は、ほぼ10 [cm/s]になっており、少ない誤差で計測ができていることが分

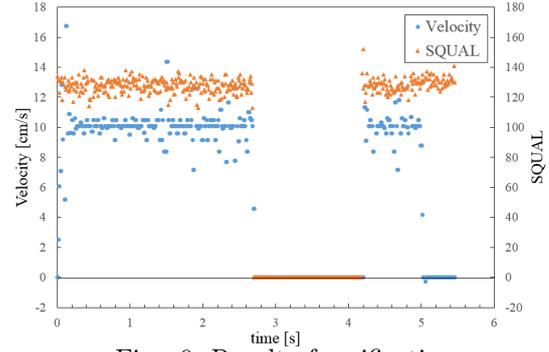


Fig. 6: Result of verification

かる。一方、速度計測装置の高さが15 [cm]となっている地点においては、速度計測装置が計測した速度は、ほぼ0 [cm/s]になっている。これは、速度計測装置の設計上の制限により、速度計測装置の高さが大きくなると、受光センサがレーザスポットを感知することができないためと考えられる。ここで、Fig. 6より、SQUAL値に注目すると、速度計測装置が計測した速度と同じく、速度計測装置の高さが15 [cm]となっている地点において、SQUAL値は、ほぼ0になっている。よって、速度計測装置が計測している際、速度計測装置の高さが急激に変化する場合においても、SQUAL値を監視し、SQUAL値が0になった場合、速度計測装置の計測する速度を不確かなものとして扱うようにすることで、速度計測装置を提案手法に利用することが可能であると考えられる。

5 結言

本稿では、クローラ型移動ロボットの、滑りに対して頑強な自己位置推定手法を提案した。また、その提案手法に必要な速度センサの性能の評価試験を行った。その結果、SQUAL値を監視し、SQUAL値の条件によって、速度計測装置の計測する速度の確からしさを判別することにより、クローラ型移動ロボットが不整地を移動する場合など、高さ方向の変化が存在する環境であっても、速度計測装置を提案手法に利用することが可能であると考察した。

今後は、本研究で得られた結果を基に、速度計測装置の性能向上に向け、速度計測装置の設計変更を行う予定である。最終的には、速度計測装置をクローラ型移動ロボットに搭載し、提案手法を実装し、提案手法の有効性を検証することを目指す。

Table. 5: Condition of verification evaluation

計測地点 [cm]	0~27	27~47	47~50
高さ [cm]	5	15	5
速度 [cm/s]	10		

参考文献

- [1] 山崎将史,竹内栄二郎,大野和則,田所諭, ”三次元地形情報およびGPSを用いたパーティクルフィルタによるマルチパスを考慮した自己位置推定”,日本ロボット学会誌 Vol.29 No.8, pp.702-709, 2011.
- [2] 大津恭平,大槻真嗣,石上玄也,久保田孝, ”自然地形におけるビジュアルオドメトリのための特徴点抽出手法に関する検討”, 日本機械学会 ロボティクス・メカトロニクス講演会 ROBOMECH2012, 2A1-L10, 2012.
- [3] Isaku Nagai, Genki Yamauchi, Keiji Nagatani, Keigo Watanabe, and Kazuya Yoshida, ”Positioning device for outdoor mobile robots using optical sensors and lasers”, Advanced Robotics, Vol.27, No.15, pp.1147-1160, 2013.
- [4] 永井伊作,渡辺桂吾, ”バンドパスフィルタによる太陽光対策を施した非接触型移動量推定デバイス”, 日本機械学会 ロボティクス・メカトロニクス講演会 ROBOMECH2012, 1A1-I11, 2012.
- [5] Sebastian Thrun, Wolfram Burgard, and Dieter Fox, ”確率ロボティクス”, 上田隆一訳, 毎日コミュニケーションズ, 2007.
- [6] 上田隆一, ”パーティクルフィルタの癖から知るロボットへの確率的手法の正しい適用方法”, 第58回システム制御情報学会研究発表講演会, 2014.
- [7] 野平暁彦,佐藤淳, ”モーションフローセンサを用いた対地速度計測システムの開発”, 計測自動制御学会東北支部第280回研究集会, 280-11, 2013