

(技術資料)

深度画像センサの外乱除去フィルタ

Disturbance Rejection Filter for Depth Sensor



濱口聖士*¹ 稗方孝之*² (博士(工学))
Masashi HAMAGUCHI Dr. Takashi HIEKATA

In recent years, data obtained from sensors attached to excavators are being actively used in assisting the operators. The processing unit logic of such a sensor system has been developed to ensure flexibility in the design of the sensor system. As a part of this development, an effort has been made to solve the problem of detecting disturbances, such as rain, snow, and insects, when the depth sensor is used for outdoor measurements. An object placed in front of a depth sensor in a raining environment was moved back and forth, and the object's appearance was continuously measured. In the measured data, points with possible disturbances were chosen. The speed, direction, and acceleration between frames were calculated as feature quantities, which led to the development of a disturbance rejection filter that eliminates the points above a set threshold. This filter has been confirmed to detect the position of objects while rejecting the influence of rain in real applications.

まえがき＝近年、センサから得られたデータをオペレータの補助に利用する動きが盛んである。例えば、ショベル後方に監視用カメラを取り付け、モニターで後方の映像を表示しつつ、周辺の物体や人物接近時に作業員へ警告するシステム¹⁾が開発されている。また、カメラセンサで取得した三次元点群データを利用し、施工現場の現状把握を短時間で行うようなシステム²⁾も開発されている。

これらの用途に適用されるセンサシステムは、専門のセンサメーカーが独自ノウハウで作りに上げていることが多い。センサシステムを他社に依存した場合、検出部と処理部が統合されてブラックボックス化してしまい(図1)、センサ変更や処理部の機能追加を行いたい場合に柔軟な対応が難しくなる。この結果、開発期間や開発コストの増大につながる。

上記の課題を解決するため、センサには汎用品を利用しつつ、処理部のロジックを自社で開発した。本稿では、ショベルに距離センサを取り付けて、屋外でショベルに接近する物体の検知を行った。この際に発生する雨や雪、虫などによる外乱を除去する手法を開発したので報

告する。

1. ショベルに用いるセンサ

日本建設機械化協会規格³⁾では、危険検知システムとしてレーザセンサや超音波センサ、超音波トランスポンダ、死角補助装置として閉回路テレビなどを取り上げて、試験方法と性能要求基準を定めている。

これらのセンサをショベルに取り付けて周囲の測定を行い、作業の状況把握、操作の補助、接近物体の検知・警告などを行うには、物体までの距離を測定できることが必要となる。このため、利用するセンサには距離センサを用いる。

距離計測に用いられる主なセンサは、レーザセンサと超音波センサである。レーザセンサは光波の高速性により精度や応答速度に優れるが、出射口の水ぬれや汚れにより、光の屈折が生じる場合に誤動作する恐れがある。超音波センサは音波の特性上、雨やほこりなどでも屈折が起こりづらいため耐環境性に優れるが、音波の伝播速度及び周波数の低さから分解能が悪く、測距時にcm単位の誤差が発生する。ショベルオペレータの周囲状況把握を補助する用途には、広い対象範囲で高い測定精度が求められるため、本稿では対象物までの距離が2次的に測定可能なレーザ方式の深度画像センサを用いた。

2. センサへの外乱の影響

屋外で深度画像センサを用いる場合、雨や雪、虫などにより測定対象物までの距離が正しく測定できない恐れがある。そこで、本稿では雨が深度画像センサの測定結果に及ぼす影響を調査した。雨が降っている環境で、深

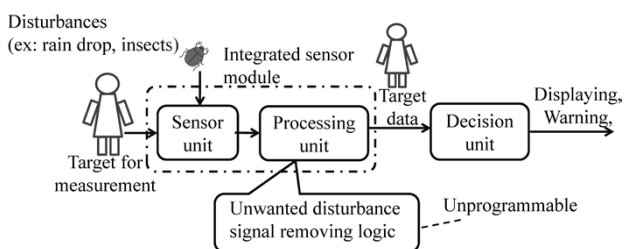


図1 センサシステムの構成
Fig. 1 Components of sensor system

*¹ (株)神戸製鋼所 技術開発本部 応用物理研究所 *² (株)神戸製鋼所 技術開発本部 開発業務部

度画像センサの前方に検出ターゲットとして物体（約75 cm四方）を配置し、物体を前後に2往復手動操作で動かした（図2）。物体の動きは数十フレーム毎秒で連続的に測定できる深度画像センサで捉えた。また、得られた二次元的な距離データから、センサー-物体間の最接近点の距離を検出した。

物体の位置検出結果を図3に示す。縦軸は最接近点の距離、横軸は測定経過時間を示している。図中には測定した最接近点距離と、過去3フレームそれぞれの最接近点距離の中央値を示す。

本来であれば、検出結果のグラフは図4のように、前後2往復を示すなだらかな山が2つあるような形状となると予測される。しかし、図3の検出結果では雨粒にレーザが反射した影響でセンサが反応して、検出位置が短時間で大きく変化していることが分かる。また、過去3フレームの中央値を採用する処理を行った場合でも、検出位置が短時間で大きく変化することは変わらず、雨の影響を除去できていないことが分かる。雪や虫などの飛

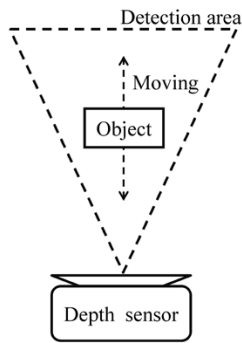


図2 実験機器の配置
Fig. 2 Equipment layout for experiment

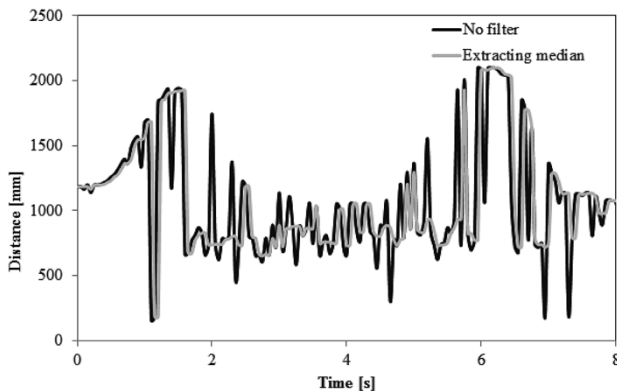


図3 物体の位置検出
Fig. 3 Detection of object position

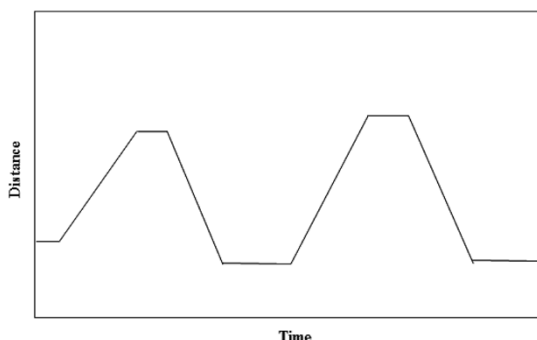


図4 物体の位置変化
Fig. 4 Image of object position change

来物でも同様の影響が発生すると予想されるため、これらの外乱を除去するフィルタについて検討を行った。

3. 外乱除去フィルタの開発

雨や雪、虫などによる外乱を除去するフィルタとして、フレームごとに検出対象も含む外乱候補となる点を複数抽出し、それらの前フレームからの移動距離に基づいて速度、方向、加速度を特徴量として算出し、検出対象がとりえる数値を上回った点を外乱と判定する手法を検討した。

本手法の基本フローチャートを図5に示す。最初に深度画像センサから距離画像を取得し、得られた距離画像に対して初期フィルタ（ノイズ除去のための平滑化フィルタなど）を施す。その後、距離画像内でセンサに最接近している点を探索して外乱候補の一つとする。外乱候補を複数抽出するため、先ほど探索した点から所定の半径 r の円範囲を距離画像内の探索範囲から除去する。この後、再度最接近点を探索する。これらの操作を所定の回数繰り返して外乱候補点を抽出する。また、測定した全てのフレームに対して実施する。

つぎに、外乱候補点の時間的関連付けを行う。外乱候補点の関連づけの例を図6に示す。ある時間 n における一つの外乱候補点 $p1(n)$ に対して、直前フレームの外乱候補点からの距離を総当りで計算する。ここで、移動距離が最短となる点を直前フレームでの同一点として時間的に関連付ける。図6では、直前フレーム $n-1$ の外乱候補点は $p1(n-1)$ 、 $p2(n-1)$ 、 $p3(n-1)$ の3点で、その移動距離は $a1$ 、 $a2$ 、 $a3$ と表される。また、 $a1 > a2 > a3$ の関係があるとする。この時、移動距離が最短となるのは $a3$

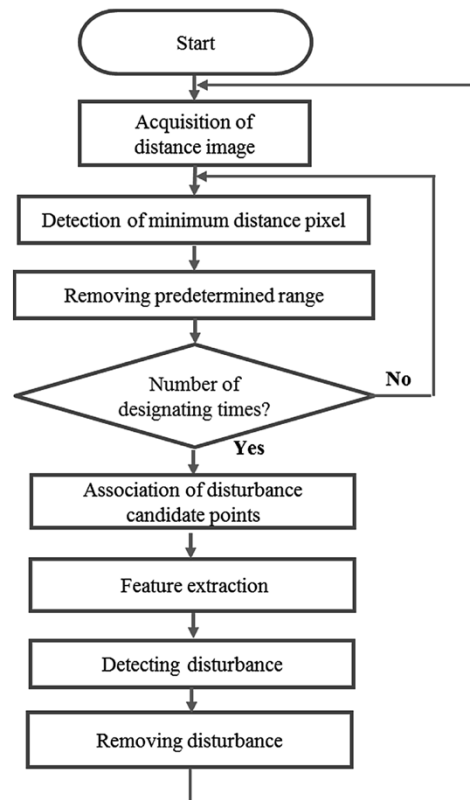


図5 外乱除去フィルタのフローチャート
Fig. 5 Flowchart of disturbance rejection filter

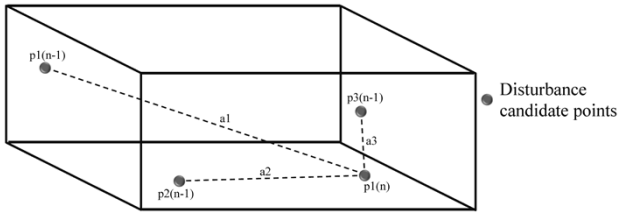


図6 外乱候補点の関連付け
Fig. 6 Association of disturbance candidate points

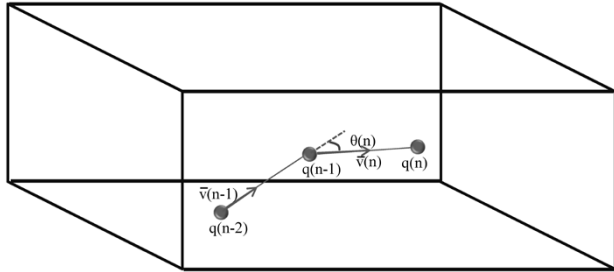


図7 外乱候補点の位置
Fig. 7 Position of disturbance candidate points

のため、外乱候補点 $p1(n)$ の直前フレームでの同一点は $p3(n-1)$ と時間的に関連付ける。

上記のように外乱候補点の時間的関連付けを行った後は、速度、角度、加速度を特徴量として計算して外乱であるかを判定する。図7のように外乱候補点が位置しており、各フレームの候補点が $q(n)$, $q(n-1)$, $q(n-2)$ と時間的に関連付けられている場合、速度ベクトル \bar{v} は式(1)、式(2)で計算できる。

$$\bar{v}(n) = (q(n) - q(n-1)) / \Delta t \dots\dots\dots (1)$$

$$\bar{v}(n-1) = (q(n-1) - q(n-2)) / \Delta t \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 Δt はフレーム間の時間である。

続いて、フレーム間の速度ベクトルの角度 θ を式(3)で計算する。

$$\theta(n) = \angle(\bar{v}(n), \bar{v}(n-1)) \dots\dots\dots (3)$$

さらに、加速度ベクトル \bar{a} を式(4)で計算する。

$$\bar{a}(n) = (\bar{v}(n) - \bar{v}(n-1)) / \Delta t \dots\dots\dots (4)$$

(1) ~ (4) 式までをそれぞれ計算した結果が、どれか一つでも設定した閾値を上回った場合には外乱と判定する。なお、速度ベクトルや加速度ベクトルは絶対値で判定を行う。

以上に述べた外乱除去フィルタにより外乱と判定された点は、距離画像上の距離計測から除外して誤検出を防止する。

4. 外乱除去フィルタの効果検証

2章で行った試験結果から最接近点を抽出する際に、

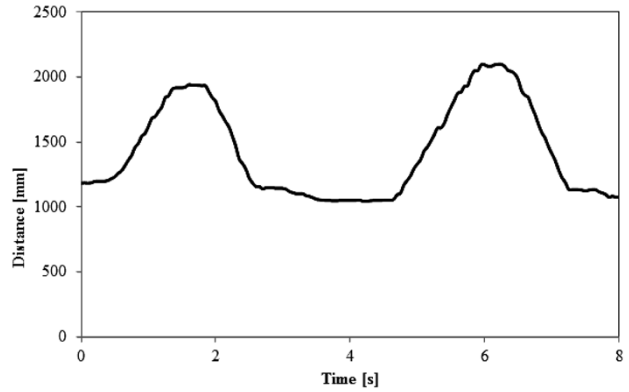


図8 フィルタリングした物体位置検出
Fig. 8 Detection of object position through disturbance rejection filter

3章で述べた外乱除去フィルタを適用し、外乱を除去した結果を図8に示す。ここでは、外乱候補の探索範囲除外半径は $r = 150$ mm、外乱候補の抽出回数は10回、外乱と判定する閾値は速度が 5 m/s、加速度が 3 m/s²、角度が 90° と設定した。フレーム間の時間は 50 ms である。なお、各閾値の設定については、速度は標準サイズ(直径 2 mm)の雨滴の落下速度約 6.5 m/s を⁴⁾、加速度は虫(ハエ)の加速度の測定最低値の約 4.8 m/s² を⁵⁾ 参考に、これらよりも低い値として設定した。角度に関しては適切なデータがなかったため、仮決めした数値である。

物体の位置検出結果は、物体を前後に2往復動かした動作がはっきりと分かるグラフとなっており、外乱の影響を除去し、検出対象の位置検出ができていことがわかる。

むすび=センサをシヨベルに取り付けて屋外環境で周囲情報取得に利用する場合に、外乱となる雨、雪などの影響を除去するためのフィルタを開発した。フィルタは、測定フレーム間の外乱候補点の速度、加速度、角度から外乱を判定して除去する構成となっており、降雨時でも物体位置が検出できることを確認した。今後、センサによる周囲の距離情報取得に本手法を利用することで、シヨベルの新機能開発を進めていく。

参考文献

- 1) 三柳直毅建設の施工企画. 2009, No.709, p.52-57
- 2) 四家千佳史ほか. コマツ技報. 2015, Vol.61, No.168, p.2-6
- 3) 社団法人 日本建設機械化協会規格. JCMAS H017, 2003.
- 4) 熊井基ほか. 気象集誌. 1954, Vol.32, No.3, p.69-76.
- 5) Robert P. Rayほか. Nature Communications. 2016 Vol.7, No.10851