

3DCG モデリングを利用した列車前方監視のための ステレオ計測の誤差推定手法

○ [電] 吉野 純樹 [電] 影山 椋 [電] 前田 梨帆 [電] 長峯 望

(公益財団法人鉄道総合技術研究所)

Error Estimation Method of Stereo Measurement for Train Forward Monitoring Using 3DCG Modeling

○Junki Yoshino, Ryo Kageyama, Riho Maeda, Nozomi Nagamine

(Railway Technical Research Institute)

Automatic train operation would be safer if it could detect obstacles, but it takes a lot of effort to verify various patterns in experiments. Therefore, we verified whether a virtual environment created by three-dimensional Computer Graphics(3DCG) modeling could replace the experiment. We confirmed that there is a certain degree of agreement between the experimental evaluation and the evaluation in the virtual environment. From this, we estimated the stereo measurement error in the real environment from the stereo measurement error in the virtual environment. This paper describes the outline of the evaluation method and the results of the error estimation.

キーワード：ステレオカメラ，列車前方映像，画像処理

(Keywords, Stereo Camera, Train Front Images, image processing)

1. はじめに

鉄道のさらなる安全性の向上のためには、支障物等との衝突事故のリスクを低減することが重要である。衝突事故リスクの要因として線路内への人立ち入りや踏切道内での車の立ち往生などが挙げられるが、自動車業界では昨今、カメラやその他センサを用いて周囲の障害物を自動的に検知する技術の開発が進められている。鉄道においても同様に、運転士の視認能力を補完する前方監視技術が求められているものの、鉄軌道上を高速で走行する鉄道の場合、自動車と比較して制動距離が長くなるため、自動車で応用されている検知手法と比べて、より遠方の対象物も確実に検知する必要がある。

鉄道総研では、将来的な列車運行の自律化のための要素技術の一つとして、図 1 のような前方監視技術の開発を行ってきた⁽¹⁾⁽²⁾。今後、開発した前方監視技術が鉄道環境において有効であるかを検証する必要があるが、様々な状況を実環境において再現することは困難である。そこで、本研究では 3DCG モデリングソフト blender を用いて様々な状況のシミュレーション画像を生成し、生成

した画像に対して画像処理を行うことによって、開発した前方監視技術の検証を行うこととした。今回、前方監視のセンサとしてはステレオカメラを想定し、図 2 のように、実際の鉄道環境における画像および 3DCG モデルを用いたシミュレーション画像に対するステレオ計測結果を比較することにより 3DCG モデルを用いることの有効性を示す。さらに、実環境では再現が難しい対象物が遠方にある状況についてもシミュレーション画像を作成して、ステレオ計測を実施することでステレオカメラの遠方における検知性能を評価した。

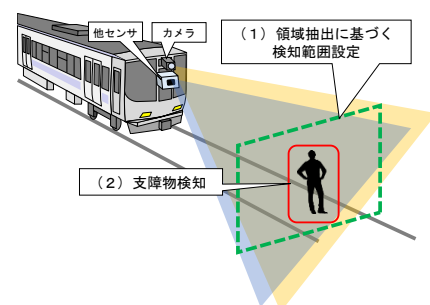


図 1. 列車前方監視の全体像

Fig. 1. The overall view of train forward surveillance.



図 2 実際の画像とシミュレーション画像
Fig. 2. Actual and simulated images

2. ステレオ計測誤差

本章ではステレオ計測時にステレオマッチングの誤差が発生した場合の距離推定誤差の理論値について述べる。ステレオカメラから撮影する物体までの距離を $Z(m)$ とし、カメラ間の距離を $B(m)$ 、焦点距離を $f(m)$ 、左右のカメラにおける視差を $D(m)$ 、画像上の視差を $N(pixel)$ 、カメラの物理的な撮像素子幅を $e(m)$ とした場合、以下の式が成り立つ。

$$Z = \frac{B \times f}{D} \dots\dots\dots (1)$$

$$D = N \times e \dots\dots\dots (2)$$

式(1)(2)より、 Z は以下のように求められる。

$$Z = \frac{B \times f}{N \times e} = \frac{Bf}{e} \times \frac{1}{N} \dots\dots\dots (3)$$

ここで、画像を撮影した際に画像上で $N_{err}(pixel)$ の誤差が発生した場合、ステレオ計測における距離推定誤差を Z_{err} とすると、以下のとおり表すことができる。

$$Z_{err} = Z - \frac{B \times f}{e \times (N - N_{err})} \dots\dots\dots (4)$$

式(4)を用いて距離推定誤差を算出する。算出にあたってステレオカメラ性能は本研究の実験に使用する表 1 とした。一般に、ステレオ計測における距離推定においては、撮像の読み取り誤差およびステレオマッチングのサブピクセル推定の誤差を含めて 0.5 pixel 程度の誤差が発生すると言われている。そこで、0.5 pixel の誤差を仮定した場合の距離推定誤差の理論値を図 3 に示す。図 3 の通常時の距離推定誤差について、解像度が HD の場合、600 m までであれば誤差 120 m 以下で距離推定できることが分かる。

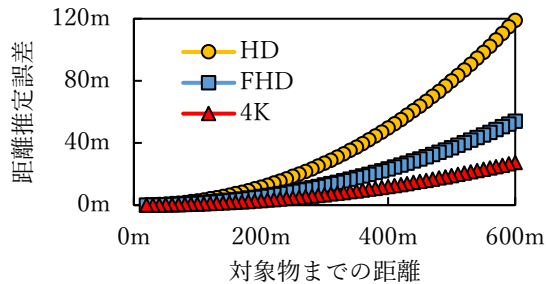


図 3 解像度毎の想定される距離推定誤差
Fig. 3. Assumed distance estimation error per resolution

表 1.カメラ諸元

Table 1. Camera specifications.

| | |
|------|-------------|
| 素子幅 | 7.9 μ m |
| 基線長 | 50 cm |
| 焦点距離 | 25 mm |
| 水平画角 | 16.1° |
| 垂直画角 | 12.1° |

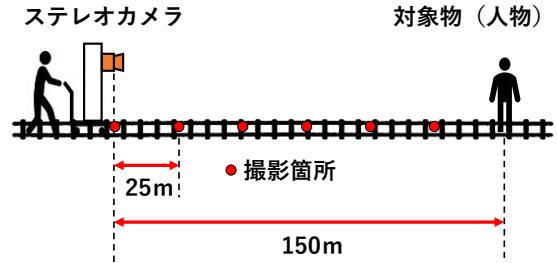


図 4. 実験のイメージ
Fig. 4. Image of accuracy experiment



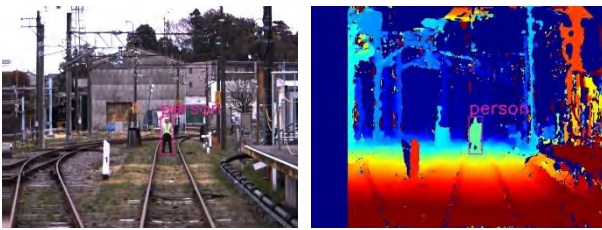
図 5 使用したステレオカメラと取得した画像
Fig. 5. Stereo camera and acquired images

3. ステレオカメラ距離推定誤差の実験値

ステレオ計測における距離推定誤差の評価実験を鉄道総研敷地内において、図 4 のように実施した。対象物として人物が 0 m 地点に立ち、基線長 50 cm のステレオカメラを 25 m 地点から、直線を確認できる最大の距離である 150 m まで 25 m 毎に移動させながら測定したステレオカメラは図 5 のとおりトロ台車に設置して画像を取得した。カメラは nerian 社製であり、諸元は表 1 のとおりである。ステレオ計測にはセミグローバルブロックマッチング⁽³⁾の手法を用いた。

ステレオ計測による距離推定誤差を算出する手順として以下の方法で算出した。

- ① ステレオカメラの左側カメラの画像に対し、Deep Learning による一般物体認識アルゴリズムである YOLOX⁽⁴⁾で人物の範囲を長方形で抽出 (図 6 左側)
- ② ステレオカメラ左右の 2 枚の画像にて、ステレオマッチングによりステレオ計測を実施
- ③ ステレオ計測結果に、①で得られた人物の範囲を重ね (図 6 右側)、範囲内の中央値を計測距離とする
- ④ 実際の人物までの距離と③で得られた距離との差の大きさ 100 回分の平均値を距離推定誤差とする



人物検知結果 ステレオ計測結果

図 6 実験画像の人物検知とステレオ計測

Fig. 6. Human detection and stereo measurement results on experimental images

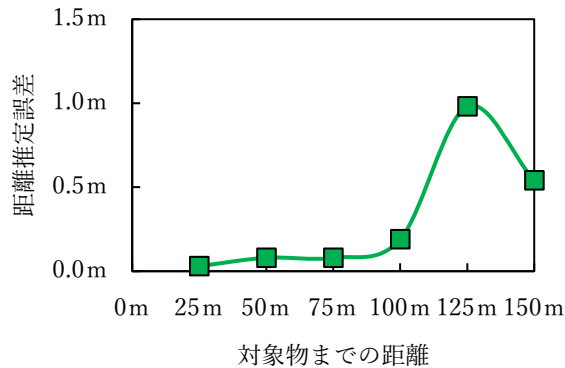


図 7. 実験における距離推定誤差

Fig. 7. Distance Estimation Error in Experiment

実験で得た画像に対してステレオ計測を行い、計算した距離推定誤差のグラフを図 7 に示す。図 7 より、対象物までの距離が 150 m 以内であれば最大でも誤差 1.1 m 以下でステレオ計測できていることが分かる。実験においては直線区間が最大 150 m までの環境であったため、これより遠方については次章にてシミュレーション画像を用いて検証することとする。

4. シミュレーション画像によるステレオ計測

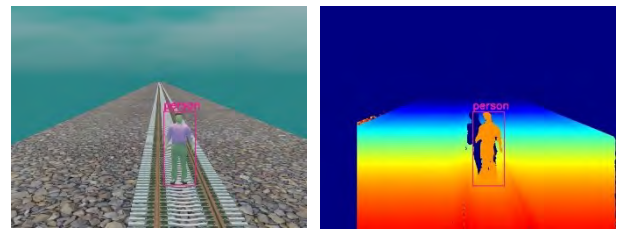
(4-1) シミュレーション画像を用いることの有用性

まず、3DCG モデルを用いたシミュレーション画像を生成し、その画像に対して処理を行って評価を行うことで、実際に撮影した画像に対する画像処理の代替となり得るかについて検証する。線路内に立つ人物の 3DCG モデルの作成には 3DCG モデリングソフト blender を使用した。



図 8. 作成したシミュレーション画像

Fig8. Simulation image.



人物検知結果

ステレオ計測結果

図 9 シミュレーション画像の人物検知とステレオ計測

Fig. 9. Human detection and stereo measurement results on simulated images

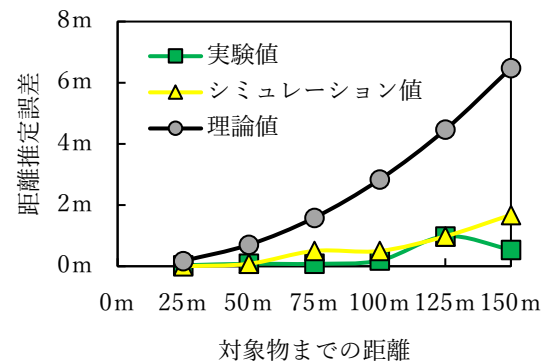


図 10. 各種距離推定誤差の比較

Fig. 10. Comparison of distance estimation errors

blender では任意の 3DCG モデルを作成でき、また架空のカメラを配置して、そのカメラからの撮影した画像を取得できる。blender 内のカメラで撮影した画像を図 8 に示す。blender にて仮想の人物および軌道面の 3DCG モデルを作成し、仮想のステレオカメラを配置することにより前章の実験で得た画像を模擬したシミュレーション画像を生成した。

作成した画像に対して YOLOX を用いた人物検知およびステレオマッチングを行った一例を図 9 に示す。このように 3DCG モデルにて作成したシミュレーション画像でも人物検知およびステレオ計測が可能である。ここでステレオ計測による距離計測誤差の比較検討を行うが、以下のように言葉を定義する。

- ・ 実験値：実験画像における距離計測誤差
- ・ シミュレーション値：3DCG モデルによるシミュレーション画像における距離計測誤差
- ・ 理論値：通常一般に想定されるステレオマッチング時の誤差 0.5 pixel が発生した際の距離推定誤差の理論値

この 3 つの値について図 10 に示す。図 10 より、実験値とシミュレーション値が共に 150 m までの範囲で距離推定誤差が 2 m 以下であり、同水準であることが分かる。このことから、3DCG モデルを用いたシミュレーション画像は実際に撮影した画像の代替となり得ると考えられる。また、実験値およびシミュレーション値は、理論値

と比較して低いことが分かる。これは、実験およびシミュレーション画像を用いてステレオ計測した際に、ステレオマッチング時に、理論値の計算において前提条件として誤差 0.5 pixel よりも小さく推定できたためと考えられる。

〈4・2〉 シミュレーション画像を用いた検証 シミュレーション画像によって実験の画像の代替とすることが可能であると考えられたため、人物を 600 m の位置に立たせ、10 m 毎に仮想のステレオカメラで撮影するシミュレーション画像を作成した。これらに対してステレオ計測によりシミュレーション値を算出した。加えて、同じ構成のステレオカメラの理論値について計算し、解像度毎にシミュレーション値と合わせて算出した結果を図 11 に示す。図 11 より、ステレオ計測により HD の場合は距離推定誤差 50 m 以下で推定できており、FHD の場合は 30 m、4K の場合は 20 m 以下で推定できていることが分かる。さらに、全ての解像度において、各距離のシミュレーション値は理論値より小さくなっており、全ての解像度において 600 m 以下の範囲でステレオマッチングにおける誤差 0.5 pixel 以下で距離推定できていることが確認できた。

ステレオマッチングにおける誤差 0.5 pixel 以下で距離推定できることが確認できたことから、式(4)を用いて任意の解像度において、実際の環境における距離推定誤差がどの程度になるか計算することができる。これにより、列車前方監視に必要な距離推定誤差についての要求に対して、その要求に合わせたステレオカメラの仕様設計を行うことができる。ここで、基本的なカメラ諸元を表 1 のとおりとして、解像度を HD、FHD、4K に加えて 8K のステレオ計測の距離推定誤差について図 12 に示す。図 12 の通り、8K においては、距離推定誤差を 600 m で 12 m 以下とできる。つまり距離推定誤差を 2%以下とできることが分かる。

このように、実環境での撮影が難しい状況であり、かつ現状では開発されていない性能のステレオカメラについてもステレオ計測の距離推定誤差を計算できることが分かった。

5. おわりに

本研究では 3DCG モデルを使用したシミュレーション画像と実験で撮影した画像のステレオ計測結果を比較することによって、シミュレーション画像で十分実験の代わりとなり得ることを示した。これにより、実環境では再現に労力がかかる状況を 3DGC モデルで作出すことによって効率的にステレオ計測の距離推定誤差の検証を行うことができることを示した。

また、ステレオ計測の距離推定精度の検証の結果、ステレオマッチングの誤差が 0.5 pixel 以下で推定できていることが分かり、シミュレーションにおいても HD のステレオカメラを用いることで 600 m までの範囲で 50 m 以下の

距離推定精度でステレオ計測できることを示した。今後は 3DCG モデルを活用し、対象物や時間帯、天候などを変化させて、より実環境に近い環境における検証を行うことを目指す。

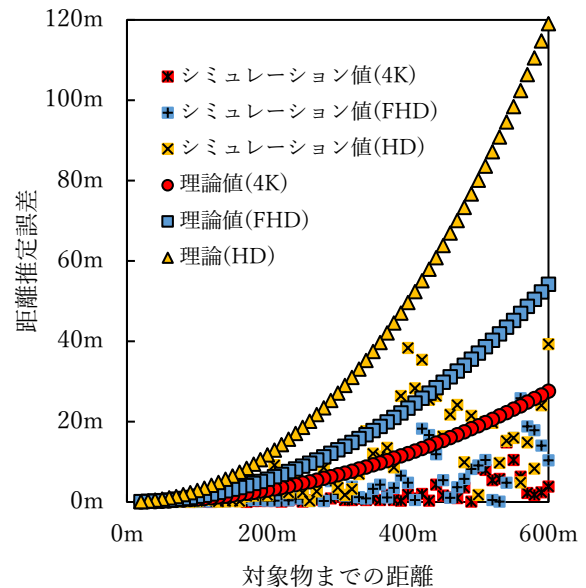


図 11. 解像度毎のステレオカメラにおける距離推定誤差
Fig. 11. Distance Estimation Error for Stereo Cameras at Each Resolution

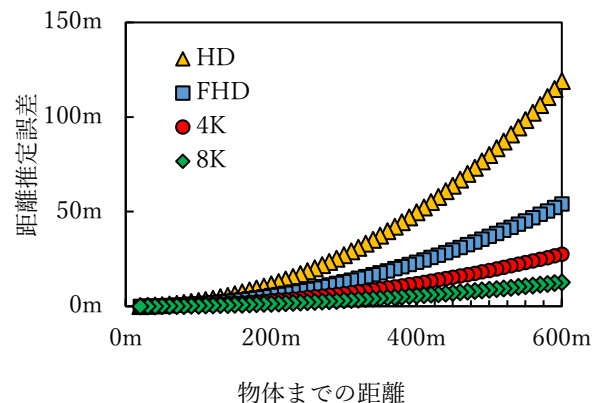


図 12. 解像度毎の距離推定誤差の理論値
Fig. 12. Theoretical value of distance estimation error per resolution

参考文献

- (1) 長峯他：「深層学習を用いた単眼カメラによる列車前方の人物検知手法」、電気学会研究会資料, TER-19-025 (2019).
- (2) 影山他：「深層学習による列車前方カメラ映像からの障害物検知手法の精度評価」、電気学会研究会資料, TER-20-074 (2020).
- (3) H. Hirschmuller：「Accurate and efficient stereo processing by semi-global matching and mutual information」、IEEE Computer Society Conference on CVPR'05, pp. 807-814 (2005).
- (4) Z. Ge, S. Liu, F. Wang, Z. Li, J. Sun: "YOLOX: Exceeding YOLO Series in 2021", arXiv:2107.08430v2 (2021).