

## 3次元シーンの取得における動的視差法と Lidar 法との比較について

岡隆一<sup>1</sup> 橋本康弘<sup>1</sup> 奥山裕市<sup>1</sup> 畠圭佑<sup>1</sup> 石塚兼也<sup>2</sup> 近野利信<sup>3</sup> 松下朋永<sup>4</sup>  
中鉢夏樹<sup>5</sup>

**概要:** 一般のシーンからの3次元距離情報は、従来 Lidar などの active sensor あるいは、stereo vision によって取得されてきた。著者らは、車やロボットなどに搭載されて単眼カメラの動画像から、3次元動画像を取得する「動的視差法」を提案している。現在、すでに公開されている距離のデータに「KITTI データセット」がある。これは、車載の Lidar によって走行中のシーンについて、計測点における距離情報が付加されたものである。このデータセットでは走行中の外界シーンについて距離を取得した際の動画も同時に公開されている。そこで、同じ動画から、「動的視差法」によって、距離動画像を作成し、「KITTI データセット」の距離動画像を対応する pixel レベルにおいての比較を行いたい。それにより、「動的視差法」による、自動運転や自律ロボット、VR のための3D シーンデータの自動作成への利用可能性を探りたい。

**キーワード:** 3D シーン、動画像、Lidar、距離動画像、自動運転、ロボット視覚、VR

### A comparison study between Motion-Parallax-Method and Lidar method for capturing a 3D scene

RYUICHI OKA<sup>†1</sup> YASUHIRO HASHIMOTO<sup>†1</sup> YUICHI OKUYAMA<sup>†1</sup>  
KEISUKE HATA<sup>†1</sup> KANENARI ISHIZUKA<sup>†2</sup> TOSHINOBU KONNO<sup>†3</sup>  
TOMOHISA MATSUSHITA<sup>†4</sup> NATSUKI CHUBACHI<sup>†5</sup>

**Abstract:** Conventionally, 3D distance information from a general scene has been acquired by an active sensor such as Lidar, or stereo vision based ones. The authors have proposed a "Motion-Parallax-Method" that acquires a three-dimensional moving image from a moving image of a monocular camera mounted on a car or robot. Currently, there is an open "KITTI dataset" including the distance data measured by a Lidar device. The distance data is the addition of distance information at the measurement point to the scene being driven by the in-vehicle Lidar. In this data set, a video of the distance acquired for the running outside scene is also opened. Therefore, I would like to create a moving 3D image from the same video by the "Motion-Parallax-Method" and place the moving distance image of the "KITTI data set" at the corresponding pixel level for comparison. By doing so, we would like to explore the possibility of using the "Motion-Parallax-Method" for automatic driving, autonomous robots, and automatic creation of 3D scene data for VR.

**Keywords:** 3D scene, Motion image, Lidar, distance motion image, automatic driving, robot vision, VR

#### 1. はじめに

我々はすでに、単眼カメラからの動画像を用いて動くシーンの各フレームの画像について、すべての pixel に (1) RGB の texture と、(2) カメラからの外界物体表面点までの距離を与える「動的視差法」と呼ぶべき方式を提案している[1].

既存の距離情報の取得手段として、Lidar 等の active sensor があるが、その取得距離データは、後述するように、シーンの他の RGB 画像や動きの情報との統合処理を必要とするなど課題を抱えている。

また、近年、VR の発展により、3次元データの作成を手動ではなく、簡便に作成することが望まれている。そこにおいては、自然の風景やシーンについて、色情報を含めての3次元データの取得を行う技術が求められている。

ここでは、自然風景の複雑なシーンからの動画のすべてのフレームのすべての画素について距離を与えるという困難な課題がある。関連研究として後述するように、画像から距離情報抽出の研究は数多くある[2,3,4]が、近年、Deep Learning (DL) を用いた動画からの距離画像の検出に、Google などが研究を活発化しており[5]、DL の最先端の研

1 会津大学

Aizu University

2 (株)MAI キャピタル, 石塚兼也公認会計士事務所

MAICapital, Inc., Ishizuka Kanenari CPA Office

3 株式会社ネットソリューション

NetSolution Ltd.

4 松下技術士事務所

MATSUSHITA P.E.Jp OFFICE

5 (株式会社アイ・ビー・エル

IPL CO, LTD.

究テーマの1つとなっている。

## 2. 動的視差法的前提となる動的視差の現象

筆者らは、日常的に観察される人間の視覚現象に依拠した動画像からの3D画像の再構成する方法を提案している[1,6-12]。その視覚現象とは、古くから知られた動的視差(Motion Parallax)である[13]。これに基づくと、DLのように学習を行う帰納的アルゴリズムではない、演繹的アルゴリズムへと導かれる。まず、動的視差の現象を図1で説明する。

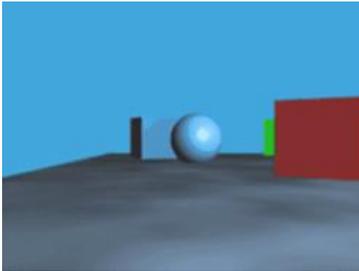


図1 動的視差(Motion Parallax)の現象 [13]: 観察者が動くとき、シーンで遠いものはゆっくり動き、近いものは速く動くことが観察される。

Figure 1 Phenomena of Motion Parallax [13] that a moving human observer cognizes faster motion of close objects than that of distance objects in a scene.

この現象はステレオ・ビジョンの基礎ともなっている。ステレオ・ビジョンでは2つの固定点での見え方(画像)を取り出し、両画像間の画素や特徴の対応から、対応点のピクセルの差(視差)を計算し、これを距離に変換している。

## 3. 関連研究

すでに提案している手法[1]は画像に基づく3次元復元の分野に属する。画像からの3次元復元の手法はこれまで数多く提案されている[12-14]。我々の提案手法と概念的に異なることが分かる程度に、簡単に既存の提案手法について触れる。まず、Shape from Xと表現されている手法群がある。ここでXには、shading, motion, silhouetteなどが入る。Shape from shadingでは複数の光源による物体への照射データから物体表面の点での法線ベクトルを推定している。Shape from motionの1つには、Factorization手法がある。これは、カメラの位置姿勢と空間点の復元を行うものであるが、動画像(motion image)における特徴点のフレーム間対応によってtrackingしたデータにSVD(singular value decomposition)を適用している。ここではノイズと特徴の誤対応が問題となる。Shape from motionには、Stereo visionを使う方法もある。Stereo vision自体、それは基本的に2つの静止画への適用であるが、動画像から視点を変えて得ら

れる多数の静止画像の対のstereo visionの結果を統合することが試みられている。Motion parallaxの時空間の3次元データから線分特徴などを取り出し、stereo visionと類似した方法を組み合わせた試みなどもある[14,15]。Shape from silhouetteでは、複数の視点から見える物体のsilhouette像を用いて、visual hullをベースに3次元空間点に存在する物体の要素を3次元のvoxelで埋め尽くしている。また最近では、Deep learningを用いた研究が盛んになっている。Googleの研究[5]では、単眼カメラの動画を対象とし、予測学習により教師なしデータを扱えるようにしている。動くオブジェクトと動かないオブジェクトを分解する(segmentation)ことも導入されている。さらに幾何的な演算で推移を構成しているが、全体構成は多くのモジュールからなり複雑なアルゴリズムとなっている。DLで教師なしの動画データでの3次元復元を行うのは、[16]などでも提案されている。いずれにせよ、DLによる3次元物体の再構成手法は研究段階であるとみえる。

## 4. 動的視差法のアルゴリズム

図1で明らかのように動的視差はそれが大きいほどカメラから物体の表面までの距離が近くなる。そこで、まず、この動的視差をよく知られたoptical flow[17]によって抽出する。このとき、optical flowは、RGB画像を明暗画像に変換し、 $t$ と $t-1$ の2つの時刻の明暗画像を用いて各画素において得るものとする。このとき各画素で得られる、optical flowは2次元のベクトルであるが、その絶対値をとると各フレーム画像はスカラーの2次元場となる。各画素におけるこのスカラーの値を $q$ と表現する。次に、 $q$ に対応するカメラからの距離を $z(q)$ と表現するとき、この2者の関係を表す幾何モデルとして図2を考える。幾何モデルは、動的視差の現象をモデル化したものである。 $q$ と $z(q)$ の微小変動 $\Delta q$ と $\Delta z(q)$ を考えたとき、以下の関係式が導かれる。

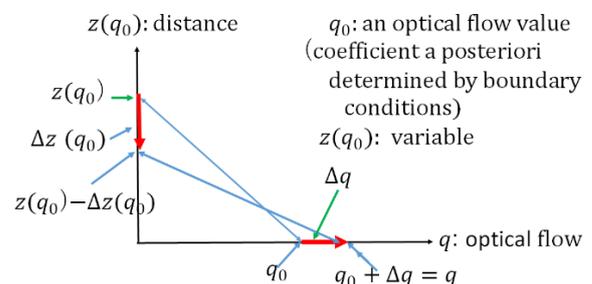


図2 動的視差法の幾何モデル

Figure 2 Geometrical model of Motion-Parallax-Model

$$z(q_0): q_0 = z(q_0) - \Delta z(q_0): q_0 + \Delta q,$$

$$q_0(z(q_0) - \Delta z(q_0)) = z(q_0)(q_0 + \Delta q),$$

$$\frac{\Delta z(q_0)}{z(q_0)} = -\frac{1}{q_0} \Delta q, \quad \log z(q_0) = -\frac{1}{q_0} q + c, \quad (1)$$

$$z(q_0) = e^{-\frac{1}{q_0} q + c} = ae^{bq}, \quad a = e^c, \quad b = -\frac{1}{q_0}$$

式(1) の関係式から、

$$z(q_0) = z(q; q_0) = ae^{bq} \quad (2)$$

が成立する。ここで、 $z(q; q_0)$  の値域の変動範囲を事前に、先験的に

$$Z_N \leq z(q; q_0) \leq Z_L \quad (3)$$

と定めるとする。動画像の1つのフレーム画像内の画素において得られた動的視差 $q$ の最小値と最大値を、 $\mu$ ,  $\gamma$  をする。動的視差の性質より $\mu$  は  $Z_L$  に対応し、 $\gamma$  は  $Z_N$  に対応するといえる。したがって、次の式が成立する。

$$Z_N = ae^\gamma, \quad Z_L = ae^\mu. \quad (4)$$

式(4) を $a$ ,  $b$  に関する連立方程式とみなして、これを解くと以下の関係式が得られる。

$$a = Z_L e^{\frac{\mu}{\gamma - \mu} \log \frac{Z_L}{Z_N}}, \quad b = \frac{1}{\mu - \gamma} \log \frac{Z_L}{Z_N}. \quad (5)$$

パラメータ $a$ ,  $b$  は事後的に定まり、したがって、パラメータ  $q_0$  も事後的に  $q_0 = -\frac{1}{b}$  として定まる。ここで、

事後的という意味は、式(3)において、 $\mu$ ,  $\gamma$  が動画の各フレームにおいて異なるためである。そこで、この事後的ということなくすため、optical flow 値の正規化を行うとする。すなわち、正規化とは、動画の各フレームで定まる optical flow 値 $q$ がそのフレーム画像において、値域 $\mu \leq q \leq \gamma$  をもつとき、予めその値域を $\mu_0 \leq q' \leq \gamma_0$  と定めておき、得られた $q$  を  $q'$  に次式で変換すればよい。

$$q' = \frac{\gamma_0 - \mu_0}{\gamma - \mu} q + \mu_0. \quad (6)$$

この正規化により、optical flow 値がカメラを搭載する移動体の移動速度による変動を取り除くことができる。4つのパラメータ、 $\mu_0, \gamma_0, Z_N, Z_L$  は事前に定められるので、パラメータ $a, b$  も事前に定まり、距離関数  $z(q'; q_0) = ae^{bq'}$  も事前に定まる。ただ、この場合、距離値の範囲は事前に与えられているので、得られる距離は相対距離を表すことになる。絶対物理距離を計算するには別途「基準距離画像」という一種の calibration を考えねばならない[18]。これについてはここでは詳しく触れない。相対距離と物理距離を繋ぐには、世界モデルを考え、そこで、カメラの地上からの高さの物理距離を媒介させる。

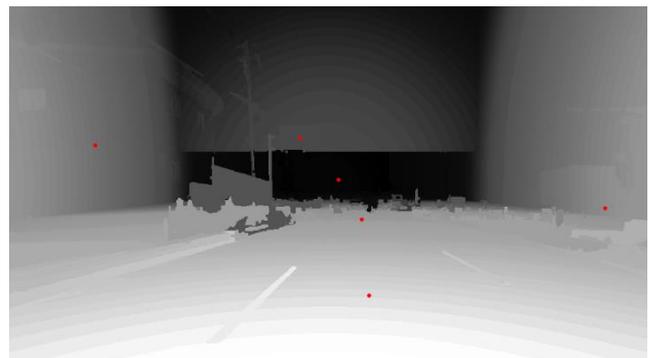
一方、Lidar 法による距離測定の方法は様々ある[19]。ここでは、距離測定には、開口レンズを用いたもの、複数のセンサーによる測定結果を融合する方法も提案されている。さらには、Lidar で用いるレーザ光が、対象物の色が

黒や緑で劣化すること、対象物が乱反射しないことなども条件であり、道路の白線については背景光がレーザの反射光に交じること、さらには、回転ミラーによるレーザ光のスキャンによる多重の反射現象も述べられている。さらには、レーザ光のあたると RGB pixel との対応も困難な課題である[19]。

## 5. 動的視差法で計測される距離の精度



(a)



(b)

図3 車載カメラからの動画像の1つのフレーム画像の6つのサンプル pixel の位置を赤の四角で示し(図3-(a))、この6つのサンプル pixel において検出されたカメラからの距離を cm 単位で示す。図3-(b)は距離値を明暗画像で示す。図3-(a)の距離値は図3-(b)の対応する pixel を示す。

Figure 3 Sampled distance data of 6 pixels from an image of a motion image captured by a dashboard car camera, and corresponded 6 pixels in the a grey level image of distance.

図3-(a) の6つのサンプル点におけるカメラからの距離値は、図3-a の画像のすべての pixel において検出された距離値の明暗画像表示である図3-(b) の赤い四角のサンプル点のものである。図3-(a) の6つのサンプル点(赤の小さな点で示している)はそのサンプル点で抽出される

距離値を示している。このサンプル点の中で、直感と異なるところは「横断歩道」が 462.8 [cm]となっているところである。この値は他の5つのサンプル点の距離値と比較すると、実際より近い距離値を示しているように見える。このように現在ではまだ不自然な距離値を示すところが皆無ではなく、補正の処理アルゴリズムを必要としているといえる。また、画面右方の対向車の距離は実際よりカメラに近い距離値を検出する。これは前方に進行する自車の速度と対向車の手前にくる速度は加算され、これにより optical flow がより大きな値を発生するためである。

## 6. Lidar の距離データと動的視差法との比較

まず、シーンからの距離取得において、Lidar 法と、動的視差法[1]との全般的違いを表1に示す。次に、動的視差法と Lidar 法により取得される距離の比較を行うために、Lidar 法による取得距離として、公開されてよく使われる「KITTI データセット」[20]を用いるとする。この「KITTI データセット」には車に搭載した Lidar による frame-wise の距離画像と同時に、同期したシーンの

表 1 Lidar 法と動的視差法の項目別比較一覧表

Table 1 Comparison between Lidar method and Motion-Parallax-Method

	測定デバイス	画像の Full pixel で距離がとれるか？	対象物体の pixel に RGB がとれるか？	対象物体の色に影響されるか？	対象物体の動きに影響されるか？	対象物体の反射率や texture に影響されるか？	搭載物の振動に影響されるか？	世界モデル(拘束)の導入	Ground truth がとれるか？
<b>Lidar 手法</b>	レーザー光線	とれない。 計測されない pixel が多い。	とれない。 カメラ映像との整合処理を要する。	黒い車体、緑の木の葉、道路の白線(背景光に影響される)など、色により劣化する。	回転ミラーのスキャンによる計測の空間位置ずれ発生する。	乱反射であることが必要である。texture はなくてもよい。	大きく影響する。 stabilize r を必要とする。	なし	対象物の色、乱反射、振動なし、静止物などの条件が満たせばとれる。
<b>動的視差法</b>	通常の単眼カメラによる動画	画像の full pixel で距離が計測できる。距離の動画が容易にとれる。	距離と RGB の色が pixel-wise にとれる。	影響しない。	影響しない。 動く物体についても距離がとれる。	模様のない壁などでは精度劣化する。 世界モデルや、texture 模様の projection で対処する。	ほとんど影響しない。	精度向上のため、仮想光源、仮想地面などを導入する。	応用に応じて Ground truth への補正を必要とする場合がある。

この影響は高速の対向車でもないかきり、大きく影響しないが、このような効果が存在することは注意する必要がある。一方、前方にある先行車については、速度の方向が自車と同一方向であることによる optical flow の大きさの減少があることも考慮する必要がある。

一方で、厳密な精度を要求されない応用もありえる。例えば、3D 動画の配信サービスや、XR などの 3D データ空間の作成など、実際の利用において人が許容できる誤差の範囲があり、その状況では現在の精度でも実用に供することができる。

動的視差法の計測距離を ground truth の距離を与える Lidar 法の距離データで、汎用に補正するアルゴリズムについては7章で述べる。Lidar の結果を ground truth と先見的にみなすことは必ずしもできない。なぜなら、Lidar を搭載した車では道路状況で振動が発生し、そのブレが Lidar 計測に影響する。また、対象物が黒や緑、また反射が乱反射でない場合、良好に距離がとれないためである。

frame-wise のカメラからの動画も入っている。したがって、動的視差法的方式をこのカメラからの動画に適用することで、動的視差法による距離動画が作成できる。これによって、2つの距離シーンの比較ができることになる。これらの結果をまず示す。



図4 動画における one shot の RGB の frame 画像（上半部分）とこの frame において Lidar によって計測された距離の明暗（256 階調）画像（下半部分）を示す。

Figure 4 One frame of a 3D motion image (upper half) and the corresponding Lidar distance image (lower half) represented by a grey level where brown pixels indicate no distance measured by a Lidar device.

図4では明暗画像（下半部分）色が白いほど Lidar からの距離が近いことを示す。この Lidar の画像において、茶色で示された pixel は距離が計測されていないことを示す。全体的に茶色で示される計測されていない pixel が多い。特に、上半部ではレーザの（小型と思われる）回転ミラーでカバーできていないと考えられる。



図5 図4に対応する動画における one shot の RGB の frame 画像（上半図）とこの frame において動的視差法によって計測された距離の明暗（256 階調）画像（下半図）を示す。

Figure 5 One frame of a 3D motion image (upper half) and the corresponding Motion-Parallel-Method distance image (lower half) represented by a grey level where full pixels are measured.



図6 動画における one shot の RGB の frame 画像（上1/3の部分）とこの frame において Lidar によって計測された距離の明暗（256 階調）画像（上から2番目の1/3の部分）を示す。

Figure 6 One frame of a 3D motion image (upper), and the corresponding Lidar distance image (middle) represented by a grey level, and the corresponding Motion-Parallel-Method distance image (lower) represented by a grey level.

図5の明暗画像（下半分）では色が白いほどカメラからの距離が近いことを示す。車や建物や木なども含め、綿密に、full pixel において距離がとれている。ただし、この距離が ground truth であるかは保証されない。Lidar の距離が ground truth であると仮定できるとき、動的視差法の距離の ground truth への補正アルゴリズムは後に示す。

図6では、動的視差法による距離画像（上から3番目の1/3の部分）を示す。明暗図では色が白いほど Lidar またはカメラからの距離が近いことを示す。この Lidar の画像において、茶色で示された pixel は距離が計測されていないことを示す。また、Lidar では左右の黒色の車体の部分、また右側の木の葉では距離が計測されていないことを示す。さらに Lidar では右側の建物の白壁が計測されていないことを示す。また Lidar では道路においても計測されていない pixel がかなりあることを示している[20]。



図7 動画における one shot の RGB の frame 画像（左右上半分）とこの frame において Lidar によって計測された距離の明暗（256 階調）画像（左下半分）と、動的視差法による距離画像（右下半分）を示す。

Figure 7 One frame of a 3D motion image (upper right and left), and the corresponding Lidar distance image (lower left) represented by a grey level, and the corresponding Motion-Parallel-Method distance image (lower right) represented by a grey level.

図7で、明暗図では色が白いほど Lidar またはカメラからの距離が近いことを示す。この Lidar の画像において、茶色で示された pixel は距離が計測されていないことを示す。また、Lidar では左右の黒色の車体の部分、また右側の木の葉では距離が計測されていないことを示す。さらに Lidar では右側の建物の白壁が計測されていないことを示す。また Lidar では道路においても計測されていない pixel がかなりあることを示している。一方、右下の動的視差法では、道路の両脇が道路より明暗レベルが白く、つまり、距離がより近く表現されており、正確な距離が計測されていないことを示している。



図8 動画における one shot の RGB の frame 画像 (左右上半分) とこの frame において Lidar によって計測された距離の明暗(256 階調)画像 (左下半分) と、動的視差法による距離画像(右下半分) を示す。

Figure 8 One frame of a 3D motion image (upper right and left), and the corresponding Lidar distance image (lower left) represented by a grey level, and the corresponding Motion-Parallel-Method distance image (lower right) represented by a grey level.

図8 下半分で、明暗図では色が白いほど Lidar またはカメラからの距離が近いことを示す。この画像は、車が信号で停止している場合である。Lidar 画像では正面にある交差点を渡る自動車の存在が分かりにくい、動的視差法ではそれがとれていることが分かる。ただし、明暗レベルが近くの道路より白く、精度は十分でないと言える。



図9 動画における one shot の RGB の frame 画像 (左右上半分) とこの frame において Lidar によって計測された距離の明暗(256 階調)画像 (左下半分) と、動的視差法による距離画像(右下半分) を示す。

Figure 9 One frame of a 3D motion image (upper right and left), and the corresponding Lidar distance image (lower left) represented by a grey level, and the corresponding Motion-Parallel-Method distance image (lower right) represented by a grey level.

図9で、明暗図では色が白いほど Lidar またはカメラからの距離が近いことを示す。この画像は、車が信号で停止している場合である。Lidar 画像では正面にある交差点を渡る自動車の存在が分かりにくい、一方、動的視差法でもそれが明確でないが、これは距離が遠い場合、明暗レベルが暗く表現され見えなくなっている可能性がある。また、動的視差法で、木の葉は距離がとれているが、道路上の影の影響が距離に影響している。

## 7. Lidar 法距離による動的視差法距離の補正

### (1) 補正アルゴリズム

いま、Lidar 法による距離測定が ground truth であると仮定する。Lidar による距離測定であってもその搭載車が道路状況で振動する場合や、回転ミラーでレーザ光を scan する場合の車の速度による変動などにより ground truth とならない場合がある。ただ、本稿では Lidar 法測定による距離を ground truth として、動的視差法の距離値をそれに補正する方法を示す。

動画において、ある固定区間長を考える。その区間長における Lidar の frame 画像の pixel について、計測値がとれたもの(すなわち、図3、図5、図6で、Lidar による取得で明暗画像化されてもので、茶色の pixel 以外のもの)をとりだし、その pixel の距離値の集合を  $V = \{f(x, y, t) : (x, y) \in (X, Y, t)_{distance}, t_{start} \leq t \leq t_{end}\}$ , ここで  $(X, Y, t)_{distance}$  は時刻  $t$  において Lidar で計測値が存在する座標群とする。また、動的視差法における距離値  $g(x, y, t)$  について、 $W = \{g(x, y, t) : (x, y) \in (X, Y, t)_{distance}, t_{start} \leq t \leq t_{end}\}$  なる距離集合を考える。ここでは、Lidar と動的視差法の距離の位置するものは同じとされる。いま、 $V$  における  $f(x, y, t)$  の値を量子化し、整数の値域を  $[1, I]$  とし、同様に、 $W$  における  $g(x, y, t)$  の値の量子化値域を  $[1, J]$  とする。値域における区間  $[1, I]$  における点  $f$  をもつ pixel の頻度を  $F(f)$  とし、同様に区間  $[1, J]$  における点  $g$  における pixel の頻度を  $G(g)$  とする(図9を参照)。次に、 $F(f), G(g)$  の2つの分布について、区間  $[1, I]$  と区間  $[1, J]$  の両端が対応するとして、両端固定の Dynamic Programming を行い、座標点  $(I, J)$  で得られた最適累積値から最適の経路を back tracing することで、 $[1, I]$  における  $f^*$  に対応する  $[1, J]$  における  $g^*$  が得られる。このとき、 $f^*$  は、Lidar の距離値であり、それに対応する動的視差法の距離値は  $g^*$  であることになる。この対応関係をつかおうと、動的視差法で得られた距離値は Lidar の距離値へ変換可能となる。

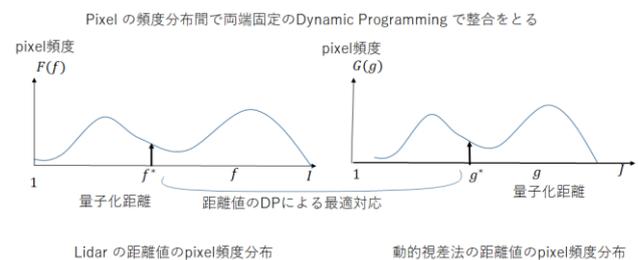


図10 2種類の距離のヒストグラムへの動的計画法適用によって、動的視差法の距離を Lidar の距離によって補正を行うアルゴリズムの説明図

Figure 10 A schematic picture of an adjusting algorithm based on dynamic programming application between histograms of two kinds of distances for transforming distances of Motion-Parallax-Method to distances measured by a Lidar device.

## (2) 補正アルゴリズムの汎化

前記の Lidar 距離値と動的視差法の距離値の対応関係が、十分な量のデータによって一度作成されれば、その対応関係を使うことによって、任意の動画からの動的視差法の距離についても、Lidar 距離データが取得されない状況でも、Lidar 距離で補正されることになる。つまり、両者の対応関係の汎化を考えることになる。

## 8. おわりに

本稿では、シーンの距離測定でよく使われるレーザ光を用いた Lidar 装置による距離計測結果と、著者らが提案する単眼のカメラの動画から距離計測を行う「動的視差法」による距離計測結果の相違を議論した。それぞれの手法には特徴があり、それぞれの特徴を生かした利用法を考えるいくつかの視点を実験例によって示した。「動的視差法」についていえば、まだ改良課題がありそれも示した。

**謝辞** 動的視差法の実装において、会津大学生の影山琢馬君には貢献を頂きました。深謝します。

## 参考文献

- [1]岡隆一, 橋本康弘, 奥山祐市, 島圭佑: "単眼カメラ搭載移動体からの撮影動画シーンの3次元動画像による再構成", Technical Journal of Advanced Mobility, pp. 2-11, Vol. 1, No. 1 (2020).
- [2]Ye Lu, Jason Z. Zhang, Q. M. Jonathan Wu, and Ze-Nian Li: "A Survey of Motion-Parallax-Based 3-D Reconstruction Algorithms", IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics Part C: Application and Reviews, (2004).
- [3]Furukawa and C. Hernandez: "Multi-View Stereo: A Tutorial. Foundations and Trends in Computer Graphics and Vision", vol. 9, no. 1-2, pp. 1-148, (2013).
- [4]鳥居秋彦, 岡谷貴之, 延原章平: "多視点3次元復元の研究動向", Vol. 2011-CVIM-176, No. 1, (2011/3/17).
- [5]遠藤智則: "グーグルが深層学習ベースの単眼SLAM技術で革新", NIKKEI Robotics, pp. 5-13, July, No. 48, 2019.
- [6]岡 隆一: "3D スマホのソフトウェアによる実現", JST 新技術説明会 (会津大学), 2019. 3. 14.
- [7]岡 隆一: "載単眼カメラからの3次元動画像の再構成と相対距離特徴抽出", JST 新技術説明会 (会津大学), 2019. 12. 17.
- [8]岡 隆一: "動画像距離算出装置および動画像距離算出用プログラムを記録したコンピュータ読み取り可能な記録媒体", 国際出願, PCT/JP2019/13289 (平 31. 3. 27).
- [9]岡 隆一: "画像距離算出装置および画像距離算出用プログラムを記録したコンピュータ読み取り可能な非一過性の記録媒体", 米国出願番号, 15/752, 892 (2018年2月15日).
- [10]岡 隆一: "画像距離算出装置, 画像距離算出方法および距離算出用プログラム", 特願 2016-170795(平成28年9月1日).
- [11]岡 隆一: "動画像距離算出装置および動画像距離算出用プログラム", 特願 2019-30904 (平 31-2 月 22 日).
- [12]Ryuichi Oka, Keisuke Hata, "Reconstructing a moving 3D image from video captured by a forward-moving camera", MIRU2018, PS3-1, August (2018).
- [13]<https://en.wikipedia.org/wiki/Parallax#/media/File:Parallax.gif>.

- [14]Vishvjit S. Nalwa, in Chapter 8 of "A Guided Tour of Computer Vision," Addison-Wesley Publishing Company, (1993).
- [15]山本正信: "連続ステレオ画像からの3次元情報の抽出", 電子情報通信学会論文誌 D, Vol. J69-D, No. 11, pp. 1631-1638, 1986
- [16]Tinghui Zhou, Matthew Brown, Noah Snavery, David G. Lowe: "Unsupervised Learning of Depth and Ego-Motion from Video", CVPR 2017.
- [17]<https://opencv.org/>.
- [18]岡隆一, 島圭介, 橋本康弘, 奥山祐市: "補正距離算出装置, 補正距離算出用プログラムおよび補正距離算出方法", 特願 2019-217358.
- [19]"センサーフュージョン技術の開発と応用事例", 技術情報協会, 2019年, 1月, ISBN978-4-86104-736-7 C3055.
- [20]The KITTI Vision Benchmark Suite:  
[http://www.cvlibs.net/datasets/kitti/raw\\_data.php](http://www.cvlibs.net/datasets/kitti/raw_data.php).