

ローリングシャッターカメラにおける高速移動体の 3 次元位置・速度の推定 3D position/velocity estimation of a fast-moving vehicle in a rolling shutter camera

井元 大輔[†] 黒沢 健至[†] 浅野 雅人[†] 櫻井 航[†] 本間 正勝[†]
Daisuke Imoto Kenji Kurosawa Masato Asano Wataru Sakurai Masakatsu Honma

1. はじめに

防犯カメラ及びドライブレコーダーの普及から、科学捜査（法科学）の分野において事件・事故における画像解析の需要が高まっている。中でもドライブレコーダーに映る物体（車両または環境）の 3 次元解析の重要性が増している[1-6]。しかし、一般に普及している防犯カメラ及びドライブレコーダーの大半は、画像の列方向(±y 方向)に順に走査しながら記録するローリングシャッター方式（図 1）が採用されており、その場合、カメラ画像に映る、あるいはカメラを搭載している、高速移動体（車両など）の位置・速度の特定が求められるケースでは、このローリングシャッター方式に伴う歪みが無視できない。そこで本研究ではこの問題解決のため、カメラと画像に映る高速移動体の位置関係を推定する 3D カメラ校正（3 次元カメラキャリブレーション）の問題において、専用計測装置[7]で計測したローリングシャッターの走査速度（以下「ローリング速度」という。）を活用することで、ローリングシャッターカメラで撮影された高速移動体の 3 次元位置・速度を高精度に推定する方法を提案し、シミュレーション系で評価した。

2. 提案方法

2.1 ローリングシャッター方式のカメラモデル

まず、グローバルシャッター方式の場合一般に、レンズ歪み補正モデル(Φ)と透視投影モデル(P)を考慮する。 X は 3 次元空間の座標、 x' をレンズ歪みのない画像座標、 x をレンズ歪みが付加された観測画像の座標として、3 次元空間からの画像化プロセスは以下の数式で表すことができる。

$$x = \Phi^{-1}(P(X, K, R, t), \varphi)$$

ここで透視投影モデル $P(X, K, R, t)$ は以下の数式で表される。

$$\xi' = K(RX + t)$$

ここで、 ξ' は x' の同次座標、 K は内部パラメータ行列、 R 及び t は外部パラメータでそれぞれ回転行列及び並進ベクトルである。本稿ではレンズ歪み補正モデル $\Phi(x, \varphi)$ は文献[6]の Model H を用い、 $x' = \Phi(x, \varphi)$ とした。カメラが既知の場合、これら内部パラメータ (φ 及び K) は、カメラ校正の手法[6]に基づきそれぞれ実直線を構成する 2 次元点群及び 3 次元-2 次元対応点群から推定可能である。

ローリングシャッター方式の場合、その原理（図 1）から、画像内で時間差が付加されるとモデル化できる。通常のカメラモデル(Φ 及び P)の他、ローリング速度 v を考慮したカメラモデルを用いる。画像上の 2 次元座標 x を $x=(x, y)$ として、画像中の座標に対応する時間 t は、再帰方程式

$$t(x, v) = t_f + (y - c_y)/v$$

に従う。なお、内部パラメータ (φ, K 及び v) はカメラ固有であり、ローリング速度 v は専用計測装置[7]から計測で

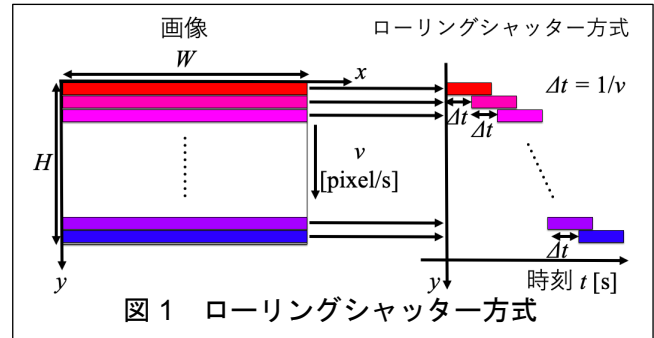


図 1 ローリングシャッター方式

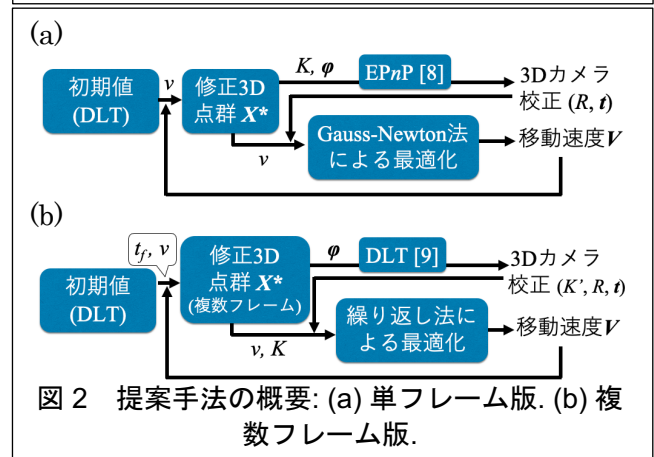


図 2 提案手法の概要: (a) 単フレーム版. (b) 複数フレーム版.

きる。このカメラモデルでは、移動速度 V で移動する対象の高速移動体の 3 次元点群 X について、移動体の座標系（後述の図 3a）から見たカメラの位置関係を示す外部パラメータ (R, t) が与えられた際の画像の単一フレームにおける対応する 2 次元点群 x は以下の数式で記述できる。

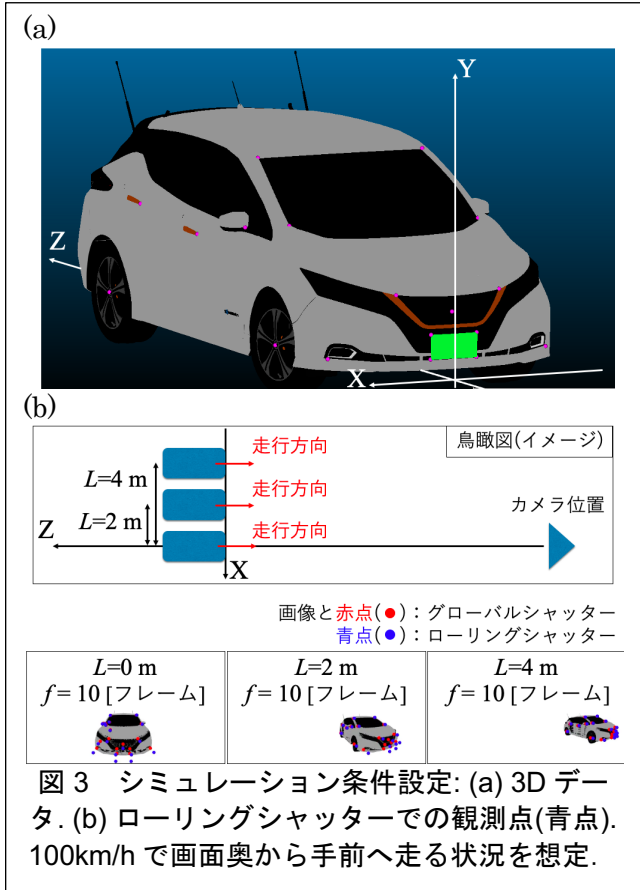
$$x = \Phi^{-1}(P(X + Vt(x, v), K, R, t), \varphi)$$

この式は x に関する再帰方程式で、各パラメータ (K, R, t, φ 及び v) が既知の際、3 次元点群 X 及び移動速度 V から、繰り返し計算でシミュレーションが可能である。

2.2 提案手法の詳細

提案手法の概要を図 2 に示す。提案手法には単フレーム版（図 2a）と複数フレーム版（図 2b）がある。いずれの場合も前提として、内部パラメータ (K, φ 及び v) の値は予め正確なものを求めておき、対象の高速移動体の画像中の 2D 座標及びそれに対応する 3D 座標の情報を予め抽出しておく必要がある。これに加え、複数フレーム版ではフレームレートも計測装置[7]で取得した値を用いる。本稿では高速移動体の対象を車両とし、後述の図 3 で定義する車両座標系に対して移動方向を Z 方向一自由度と近似し $V=(0, 0, V_z)$ とした。なお、本稿の評価の範囲外とするが、車両の進行方向が Z 方向または $-Z$ 方向でない場合、速度ベクトルを $V=(V_x, V_y, V_z)$ のように最大の 3 自由度を推定対象とすることは可能である。

[†] 科学警察研究所 National Research Institute of Police Science



単フレーム版 (図 2a) では、1 フレーム内でのローリング速度に起因する時間差を利用して、移動速度 V_z により時間依存的な 3D 座標の補正を行う。この補正済みの 3D 座標に基づき EPnP [8]による 3D カメラ校正で外部パラメータ (R 及び t) を推定する。このパラメータを 3D 座標に適用し再投影誤差最小基準に基づきガウスニュートン法により移動速度 V_z を最適化する。以上、3D カメラ校正と移動速度推定の手順を繰り返す。

複数フレーム版 (図 2b) では、1 フレーム内の時間差に加え、フレーム間の時間差を考慮する。単フレーム版と同様に基準時刻からの時間差と移動速度を加味した複数フレームの 3D 座標の情報を統合した補正 3D 座標を用い、DLT 法[9]により 3D カメラ校正を行う。内部パラメータ誤差最小基準に基づき繰り返し計算により移動速度を最適化する。以上、3D カメラ校正と移動速度推定の手順を繰り返す。

2.3 評価方法

提案手法の評価にあたり、図 3 に示す条件でシミュレーションを実施した。図 3a に示す CG trader で購入した車両の 3D モデルを使用した。図 3a のピンク色の点に対象となる 3D 点群 (18 点) の位置を示す。X 方向を車両の左右方向、Y 方向を鉛直上方向、Z 方向を車両の前後方向と定義した。図 3b 上段に XZ 平面 (鳥瞰図) を示す。140cm の高さで 3 度見下ろす向き、光軸を XZ 平面上に射影すると Z 軸方向となるカメラに対し、車両が-Z 方向に 100km/h で直進する状況を考える。-X 軸方向のオフセット長さを L とし、 $L=0, 1, 2, 3, 4$ m の 4 通りを考える。ローリング速度 v は実際の計測値[7]を参照し $v=36$ [pixel/ms]とした。

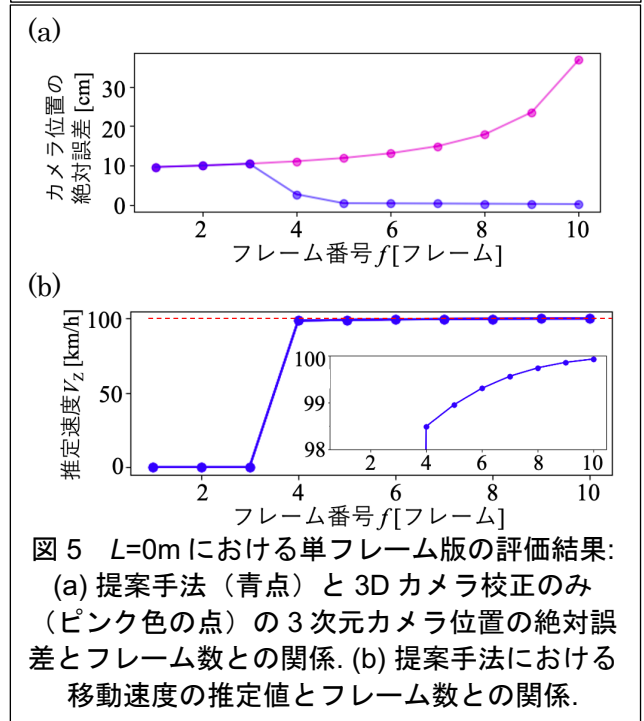
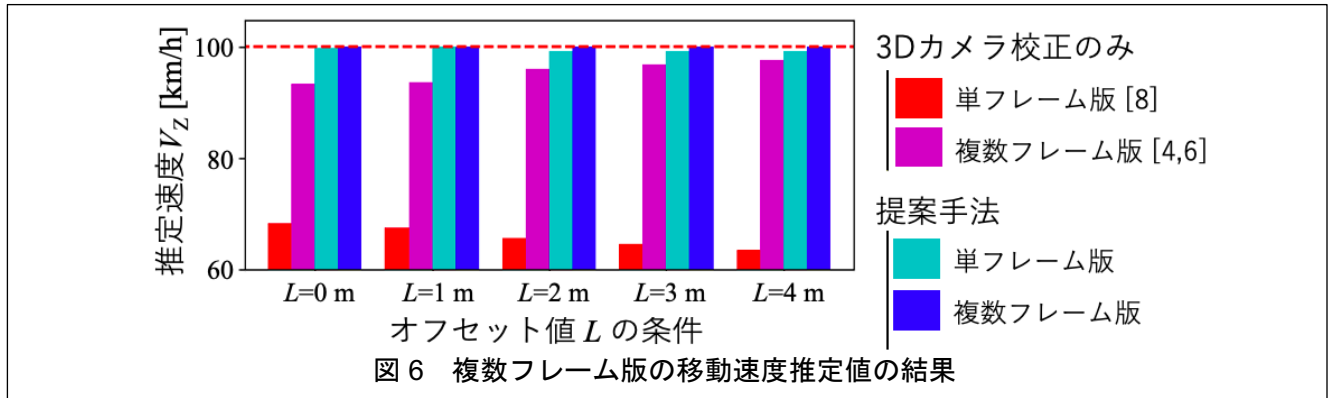


図 3b 下段に $L=0, 2, 4$ m における 10 フレーム目のシミュレーション結果を示す。また、 $L=0$ m における 9 フレーム目と 10 フレーム目のシミュレーション結果を図 4 に示す。図 3b 下段と図 4 において、ローリングシャッター方式で観測される対象点群 (18 点) の観測点は青点であり、画像と赤点はグローバルシャッター方式の場合 (参考情報) で



ある。提案手法では、図 3a の 3D 点群と対応する画像座標 (図 3b 下段及び図 4 の青点) が既知の際にカメラの位置及び角度 (3D カメラ校正) 及び移動速度 V_z を推定する。カメラ位置の推定精度は 3D カメラ校正のみの場合 (ローリングシャッター方式の考慮なし) と比較し、複数フレーム版は移動速度 V_z の結果について、ローリングシャッターの考慮と複数フレームの考慮の相乗効果を比較した。

3. 結果

3.1 単フレーム版の解析精度評価

単フレーム版の評価結果を図 5 に示す。図 5a は 3 次元カメラ位置の絶対誤差の結果で、提案手法を青色で、比較対照として単純な 3D カメラ校正のみの場合 (ローリングシャッター効果を考慮しない場合) をピンク色で示した。3 フレーム目以前は対象車両が十分遠くローリングシャッターの効果が見られず差異がなかったが、4 フレーム目以降はフレーム数が増すほど対象車両が近くに映るため、ローリングシャッター効果を考慮しない参照手法では誤差が急増するのに対し、提案手法ではローリングシャッター効果の考慮により誤差が逆に低減していく結果となった。特にカメラと車両が 2m 以内に近接する 10 フレーム目では 3D カメラ校正のみでは誤差が 30cm を超えたが、提案手法では 1cm を下回った。次に、図 5b に提案手法における移動速度の推定値とフレーム数との関係を示す。図 5a で提案手法の効果が見られた 4 フレーム目以降では、真値 (100km/h) に近い推定値が得られており、フレーム数の増加に伴い真値に近づくことが見出された。

3.2 複数フレーム版の解析精度評価

複数フレーム版の移動速度の評価結果を図 6 に示す。比較対照として、3D カメラ校正のみの場合と単フレーム版の場合の組み合わせも示した。なお、単フレーム版ではカメラと車両が近接する 4 フレーム (7~10 フレーム目) の解析結果から算出した。 $L=0\sim 4$ m の全ての場合において、提案のローリングシャッターの考慮に加え、複数フレームの考慮により、更に精度が向上することが見出された。速度が一定という仮定が妥当な場合、提案手法の複数フレーム版が最も精度が高いことが示された。

4. おわりに

本研究では、画像内容からカメラと被写体の高速移動体との位置関係を推定する 3D カメラ校正において、専用計測装置[7]で計測されたローリング速度を活用することで、

高速移動体の 3 次元位置・速度を高精度に推定する方法を提案し、ローリングシャッターに加えてレンズ歪み等の実環境を考慮したシミュレーションデータを用いた精度評価により有効性を示した。本研究の提案及び評価により、車両が Z 方向または -Z 方向に真っ直ぐに一定速度で進行すると仮定できる場合は、提案手法の複数フレーム版を活用することが最も望ましいと考えられた。車両の進行方向が Z 方向または -Z 方向でない場合は、2.2 節に記したように速度ベクトルを最大の 3 自由度考慮すること自体は可能であるが、状況に応じた精度評価が必要である。更に、実際には高速に移動する被写体の場合、ブレ等が加わり画像上の特徴点の誤差が生じることから、提案手法 (のみならず 3D カメラ校正そのもの) の精度はカメラの露光時間の制限も受けることになる。この点は実カメラ及び実車を用いた評価実験の実施により今後の検証が必要である。

謝辞

本研究の一部は JSPS 科研費 20K19835 の支援を受けた。

参考文献

- [1] 吉川 丞, 中島大輔, 前田 靖, 児玉智章, 小出健次, 恒松和也, 一色 駒一郎, 福山有美, 松本 学, 大賀 涼, 大倉史生, 村松大吾, 横原 靖, 八木康史, 斎藤英雄, “3D スキャナを活用した現場再現法の検討”, 日本法科学技術学会第 25 回学術集会 (2019).
- [2] 濱野 聖也, 三浦 雅和, 福間昌夫, “仮想現場再現法における車両の物理的拘束条件の検討”, 日本法科学技術学会第 26 回学術集会 (2020).
- [3] 大沢洋平, 山本康夫, “透視投影モデルに基づいた仮想路面差し法の検討”, 日本法科学技術学会第 27 回学術集会 (2021).
- [4] 井元 大輔, 本間 正勝, 秋葉教充, 平林学人, 小野塚信太郎, 秋田仁也, 黒沢健至, “透視投影モデルに基づく車載・防犯カメラ画像に映る車両の移動距離推定の高精度化: 幾何的な制約による複数フレームの活用”, 信学技報, **122**(30), pp.91-96 (2022).
- [5] 戸山 恭平, “三次元点群を用いたカメラキャリブレーションにより再現した視点の精度に関する研究”, 日本機械学会 2022 年度年次大会 (2022).
- [6] 井元 大輔, 本間 正勝, 秋葉教充, 平林学人, 小野塚信太郎, 秋田仁也, 黒沢健至, “法工学鑑定のための画像の幾何解析プログラムの開発”, 日本法科学技術学会誌, **28**(1), pp.15-42 (2023).
- [7] 黒沢 健至, 井元 大輔, 横田 亮, 本間 正勝, 浅野 雅人, “ローリングシャッター対応時間的カメラ特性の計測装置の開発”, 日本法科学技術学会第 28 回学術集会 (2022).
- [8] V. Lepetit, F. Moreno-Noguer, and P. Fua, “EPnP: An Accurate $O(n)$ Solution to the PnP Problem”, *Int. J. of Comput. Vis.*, **81**(2), pp.155-166 (2009).
- [9] R. Hartley, A. Zisserman, “The direct linear transform (DLT) algorithm”, in: *Multiple View Geometry on Computer Vision* (2nd ed.), Cambridge University Press, pp.88-93 (2004).