

車両側面カメラによる安全確認支援装置の開発

合田 航* 向嶋 宏記* 長峯 望*

Development of Safety Check Support Device for Driver Using Side Camera on Rolling Stock

Wataru GODA Hiroki MUKOJIMA Nozomi NAGAMINE

This paper describes the development of a safety check support device to further enhance safety check on the platform using side cameras on rolling stocks. Utilizing deep learning-based image processing techniques, the developed device detects the approach of passengers on the platform in real-time from camera footage to notify the driver of it, providing assistance in safety checks. Additionally, the device is equipped with the function of automatic passenger counting at each station. This paper presents an overview of the developed device and reports the results of the evaluation experiments.

キーワード：車両側面カメラ，ワンマン運転，物体検知，画像処理，ディープラーニング

1. はじめに

現在，ワンマン運転を実施している列車では，運転士がプラットフォーム上に設置されているホームミラーなどを目視することによって，旅客の安全確認が行なわれている。これに対して，近年では運転士の目視による安全確認の新たな方式として，車両側面カメラを搭載した車両の運用が一部ワンマン運転区間で始まっている。このような区間では，車両側面カメラにより得られた映像が運転台に表示され，運転士はこの映像を見ることで旅客の安全確認を行っている。

筆者らは，車両側面カメラを活用したさらなる安全性の向上を目的として，画像処理技術によってカメラ映像からホーム上の旅客の接近をリアルタイムで検知する装置を開発した。システムの全体像を図1に示す。

このシステムにより，ドア開閉時の安全確認だけでなく，ホーム進入時や進出時など運転士がカメラの映像のみを注視することが難しいタイミングでも，ホーム上の旅客の安全確認を支援できるので，運転士の負担が軽減される。

さらに，開発した装置は，安全確認の機能に加え，乗降人数カウントの機能も備えている。装置が駅ごとにカウント処理を自動で実行し，その情報を csv 形式等で保存する。ダイヤや運用両数の設定，ワンマン化する区間や線区の拡大など運用上の意思決定における判断材料として，この情報を活用可能である。

本論文では，2章で車両側面カメラの概要を述べ，3章，4章で提案するアルゴリズムを説明する。5章でアルゴリズムの装置への実装，6章で装置の性能評価の結果を示す。最後に7章でまとめについて述べる。

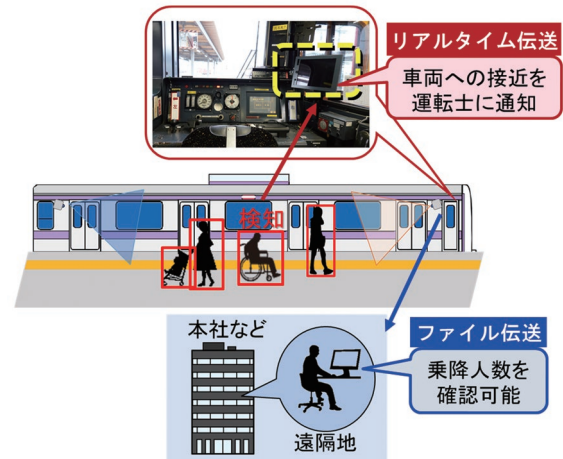


図1 システムの全体像

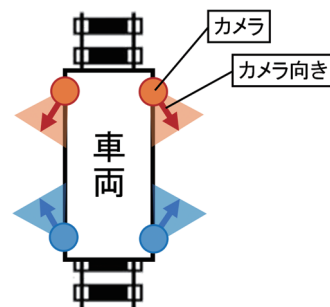


図2 車両全体に対する車両側面カメラの配置

2. 車両側面カメラ

車両側面カメラは，車両の前後左右の4箇所に設置されている。車両進行方向に対して，車両の後方から前方を監視するカメラと前方から後方を監視するカメラが左右にそれぞれ存在する。車両を真上から俯瞰した図を図2に示す。丸のシンボルがそれぞれ車両側面カメラを表

* 情報通信技術研究部 画像解析研究室

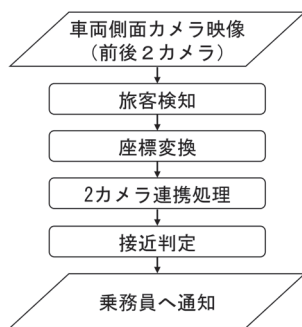


図3 安全確認支援手法の処理フロー

しており、矢印がカメラの向きを示している。

それぞれのカメラは、車両ドアの高さ程度に設置されており、斜め下に向けてプラットフォーム全体を監視できるような俯角、画角で設置される。

運転台のモニターは、車両の進行方向に対して、前方から後方を撮影した映像を表示する。車両が駅に停車し、ドアが開くとカメラ映像が表示され、発車後、一定速度を超過すると表示がオフとなる。また、ドアを取り扱うホーム側のカメラの映像が表示される。

3. 安全確認支援アルゴリズム

3.1 全体の処理フロー

車両側面カメラによる安全確認支援アルゴリズムは、図3に示す処理フローとなり、大きく分けて4つの処理によって構成される。はじめに、1車両から得られるホーム側前後2カメラの映像中に映っている旅客を、ディープラーニングによって作成したモデルが検知する。次に、その旅客の接近状態を推定するため、画像中の座標から実距離の座標へ変換し、車両への接近距離を算出する。最後に、前後2カメラ分の映像から得られた旅客の接近距離に対して事前に設定した閾値に応じて「注意」や「危険」といった判定を行う。

次節以降で、処理の具体的な内容について述べる。

3.2 旅客検知

取得されたカメラ映像に対して、ディープラーニングにより作成したモデルを用いて検知を行う。検知対象の旅客として、人物（全身・頭部）、車いす、ベビーカー、白杖をディープラーニングにより学習させ、検知を行うモデルを作成した。学習には、図4の例に示すような鉄道総研で撮影を行った独自のデータセット36,000枚のほか、人物が映ったCOCOデータセット¹⁾等のオープンデータから24,734枚の画像データを追加した計60,734枚の画像データを使用した。鉄道総研内の実験環境における検知の様子を示したものが図5である。図5より、検知された旅客が外接矩形で描画される様子が



図4 作成した学習データの例

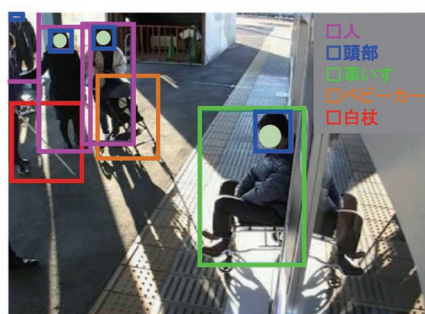


図5 旅客検知の様子

確認できる。

3.3 座標変換

検知された旅客に対する外接矩形の底辺中心を足元座標として定義する。この足元座標に対して、射影変換²⁾を用いて、実距離と対応したホーム俯瞰座標を算出する。カメラ座標系において撮影された平面上の任意の点 $X_{cam} \in \mathbb{R}^2$ に対して、実距離座標系における対応点 $X_{real} \in \mathbb{R}^2$ とする。このとき、2点間の写像は、ホモグラフィ行列 $H \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ (ただし、いずれかの要素は1) によって、以下で示される。

$$\begin{bmatrix} X_{real} \\ W' \end{bmatrix} = H \begin{bmatrix} X_{cam} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$X_{real} = \frac{X'_{real}}{W'} \quad (2)$$

ここで、 \mathbb{R} は実数集合であり、 $W' \in \mathbb{R}$ は $W' \neq 0$ を満たす。上式より、未知変数は8つであるので、対応する X_{cam} , X_{real} が4点存在すれば H は一意に定まる。

これを利用し、実寸のサイズが既知である視覚障害者誘導用ブロック（以下、点字ブロック）数個分の四角形の頂点4点とそれに対応する点字ブロックの画像上の4

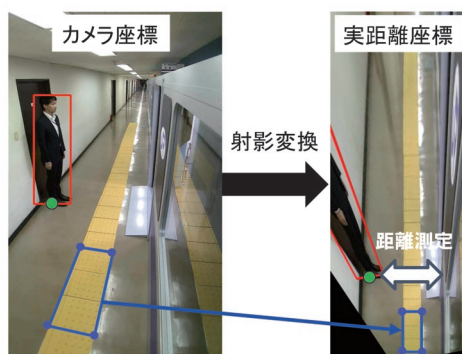


図6 旅客検知と実距離座標の算出

点により実距離座標への変換式を求めることができる。

変換式は各カメラで一度算出し、カメラの設置位置が不変かつ駅のホーム面高さが規格の基準内を満たす限り、駅ごとの変換式は同一とみなせる。また、変換式については、AR マーカーで自動算出することも可能である³⁾。実際に射影変換を行うと図6のように実距離に対応する座標に変換できる。

3.4 2カメラ連携処理

車両長である約20mの安全確認を行うため、2台のカメラの連携処理を行う。2台のカメラの検知領域が図7のように車両長の半分より長い範囲となるように設定する。検知領域の設定理由は、カメラに対して人物が遠いほど位置算出精度が低下することから、それぞれのカメラに対して近い領域側を検知領域とするためである。

また、2台のカメラの両方の検知領域となる図7中斜線部分が車両の中央付近に存在する。これは、境界付近での検知漏れを防ぐためである。両方の検知領域が重なる部分については、同じ人物を二重で検知する可能性があるが、安全側の過検知であり、運用上の問題はない。

3.5 接近判定

点字ブロックの内側（ホーム端から離れる側）は安全、点字ブロック上は注意、点字ブロックの外側（ホーム端側）は危険といった接近の基準がある。しかしながら、点字ブロックの設置位置が駅ごとに異なる場合や点字ブロックが設置されていない場合なども考えると、必ずしも統一された安全基準として判断に使うことはできない。したがって、統一的安全基準で判定を行うため、接近判定を点字ブロックの内外ではなく、車両と旅客間の距離で判定することとした。

通常の点字ブロックによる基準と合致するように、車両から100cm（車両とホームの間隙20cm+ホーム端から点字ブロックまでの距離80cmと想定）までを危険、100cm～140cm（内方線付き点字ブロックの幅40cmを想定）を注意、それ以外を安全とする判定基準を暫定的

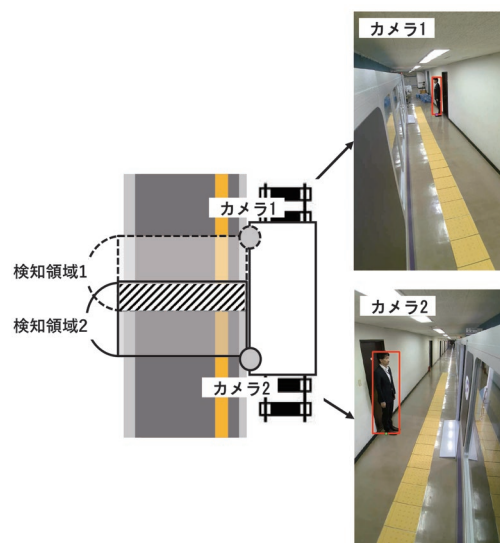


図7 2カメラの連携処理

に採用している。この基準は任意に変更可能である。

4. 乗降人数カウントアルゴリズム

4.1 全体の処理フロー

開発した装置では、安全確認支援に加えて乗降人数カウント機能も搭載した。この機能は、安全確認支援機能の一部を流用することで、計算量を抑えつつ、さらなる活用の幅の拡大を目指したものである。

車両側面カメラによる乗降人数カウントアルゴリズムは、図8に示す処理フローとなり、大きく分けて3つの処理によって構成される。安全確認支援アルゴリズムと同様にディープラーニングにより作成したモデルが検知を行い、検知した対象の追跡を行う。これにより、検知対象の移動の軌跡が取得可能となる。次に、検知した対象に対して、設定したドア位置を通過した方向と人数を求めることで、乗降人数をカウントする。最後に乗降人数カウントデータをcsv形式等で出力する。

次節以降で、処理の具体的な内容について述べる。ただし、旅客検知については安全確認支援アルゴリズムと同様であるので省略する。

4.2 追跡

検知した旅客に対して過去の数フレームから同一旅客であることを特定し、追跡を行う。追跡のアルゴリズムにはBytetrack⁴⁾を採用した。Bytetrackでは、図9のように旅客検知の出力で検出の信頼度が過去フレームにおいて高かった対象が遮蔽等により一時的に信頼度が下がっても、過去フレームから予測できる追跡により位置を推定する。これにより、乗降時などの旅客同士の重なりが頻発する場面でも見逃さずに追跡が可能となる。ま

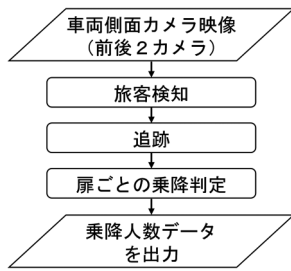


図8 乗降人数カウントアルゴリズムの処理フロー

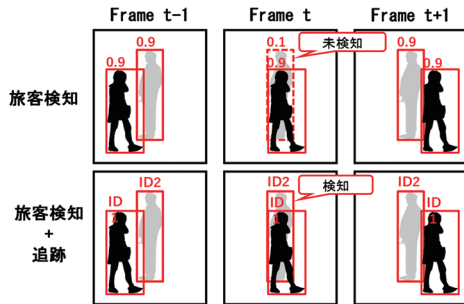
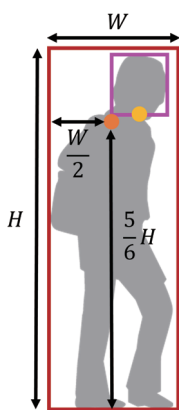


図9 ByteTrack による追跡



図10 カウントする扉の設定 図11 追跡点の定義 (人物は試験関係者)



た、ByteTrack の処理時間は1~3ms であり、リアルタイムでの処理が可能である。

4.3 扉ごとの乗降判定

図10のようにカウントする扉に対して、それぞれ基準線(図10中の緑線)を設定する。この基準線への通過方向と回数を計測して乗降人数をカウントする。カウントする際に追跡する点は、図11中に橙色と黄色の点で示した2点を設定する。基本的には、混雑時でも映りやすい頭部の底辺中心(図11中の黄点)を追跡点としてカウントを行う。一方、未検知が起こるケースも想定し、その際には足元座標から全身の5/6の高さの点(図11中の橙点)を代替の追跡点としてカウントを行う。足元座標から全身の5/6の高さは、人間の平均の頭身が

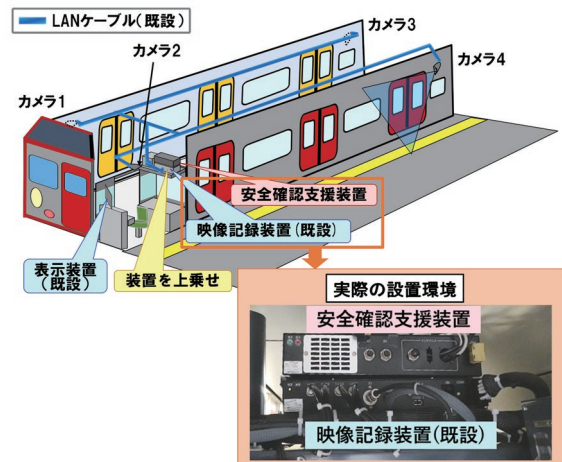


図12 全体の装置構成

7頭身程度であり、斜め上から映る影響でやや少なめの頭身に映ることを考慮したものである。

5. 車載装置の開発

5.1 全体の装置構成

車両側面カメラによる安全確認支援装置の全体構成を図12に示す。図中のカメラ、LANケーブル、映像記録装置、表示装置は車両側面カメラシステムとして既存の設備として設置されているものである。これに対し、3章、4章のアルゴリズムを実装した安全確認支援装置を搭載することで、支援機能を追加で導入する。

5.2 装置の設計

装置の設計にあたり、1車両に1台の安全確認支援装置を搭載することを考えると、車両数に応じて多数の装置が必要となる。したがって、1台当たりを可能な限り低コストで実現できることが望ましい。その際、コスト面での課題はディープラーニングにより作成したモデルでの検知を使用している点である。この処理には多くの並列演算を要するため、一般的にはGPUなどの高価な画像処理用半導体を用いられる。

これを避けるために、ディープラーニングにより作成したモデルでの検知の高速化を実施し、CPUのみで検知可能なモデルを作成した。これは、通常の学習を行った高性能なモデルに対して、図13に示すような、中間層を削減する(知識)蒸留とネットワーク構造を最適化する枝刈りと呼ばれる軽量化技術を使用することで実現した。

これにより、CPUのみで20ms前後でディープラーニングにより作成したモデルでの検知が可能となり、処理全体を含めても100ms以内で完了することができる。

以上より、安全確認支援装置の処理部はCPUのみを

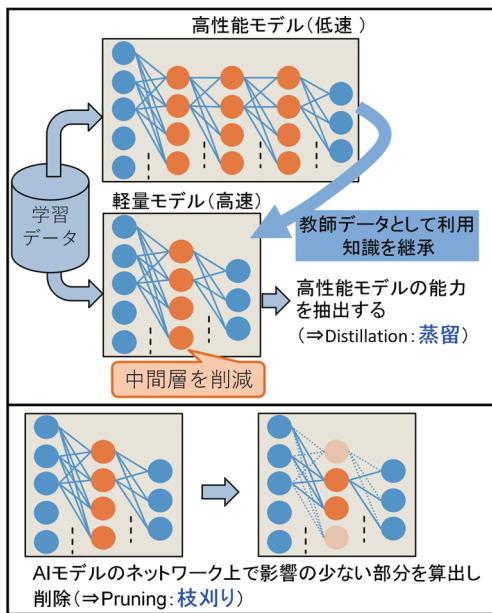


図 13 ディープラーニングモデルの高速化



図 14 安全確認支援装置の外観

表 1 安全確認支援装置の仕様

仕様一覧	
入力電圧	DC100V (+10%, -30%)
消費電力	最大 100W
使用温度	-10~50℃
使用湿度	20%~90% (結露無きこと)
外形(W×D×H)	390mm×260mm×70mm
設計質量	5kg 以下
搭載 CPU ボード	CPU : core i5-1185GRE Clock : 1.8GHz メインメモリ : 8GB
LTE ルータ機能	閉域 SIM VPN 通信に対応

採用した。その結果、専用冷却ファンが不要となり、小型化、低騒音化、耐振動性 (JIS E4031「鉄道車両用品-振動及び衝撃試験方法」適合) 等が実現可能となった。上記を踏まえて開発した安全確認支援装置プロトタイプの外観を図 14、仕様を表 1 に示す。LTE ルータの機能により、検知結果や乗降人数のデータの伝送も可能である。

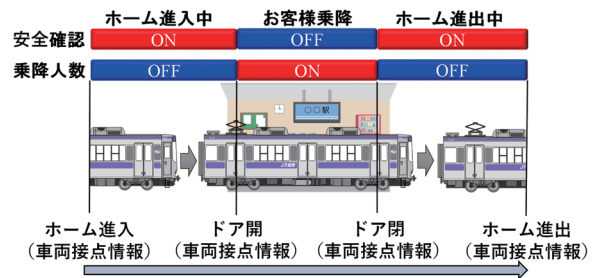


図 15 処理実行のタイミング



図 16 運転士への表示画面例 (人物は試験関係者)

5.3 既存の車両側面カメラシステムとの連携

安全確認支援及び乗降人数カウント機能を適切に実行するためには、装置を既存の車両側面カメラに接続し、連携する必要がある。連携が必要な部分は、安全確認支援と乗降人数カウントを ON/OFF する処理実行タイミングの決定と安全確認支援における運転士への通知である。それぞれについて述べる。

5.3.1 処理実行のタイミング

処理実行のタイミングを図 15 に示す。車両の接点情報を既存システムから受け取り、ホーム進入、ドア開、ドア閉、ホーム進出の 4 つをタイミングの基準とする。安全確認の通知に関して、ドア開～ドア閉までの旅客乗降中は、注意や危険となる領域に侵入してくることは通常の挙動である。したがって、このタイミングで注意や危険等の通知は実行しない。通知が必要なタイミングはホーム進入からホーム進出のうち、お客様の乗降がないときであると、乗降中は通知を OFF とした。一方、乗降人数カウントについては、ホーム進入、進出時に旅客が乗降することはないはずであり、このタイミングでは処理を OFF とする。

5.3.2 安全確認支援における運転士への通知方法

安全確認支援装置による接近判定の情報を、既設の乗務員への映像表示装置 (タブレット端末) へ通知する。検証用に作成した表示方法を図 16 に示す。「注意」、「危険」など接近状態ごとに外枠の表示を行い、音による発報も行う。また、検知対象の種別 (人物、車いす、ベビー



図 17 走行試験の様子（人物は試験関係者）

カー、白杖）も表示可能である（図 16 中画面内に白文字で表示）。現在の表示方法は暫定であり、各鉄道事業者の運用方法や安全への考え方に合わせて、個別にカスタマイズすることで通知方法を変更可能である。

6. 性能評価

6.1 走行試験による安全確認支援の精度評価

車両側面カメラによる安全確認支援装置の動作確認および性能評価を行うため、車両側面カメラシステムが搭載されている 815 系車両に試作した安全確認支援装置を接続した。JR 九州鹿児島本線（八代～熊本）で試運転列車による走行試験を 2 往復（日中・夜間）で実施した。試験の様子を図 17 に示す。

走行した 22 駅停車分の映像を解析し、誤検知率と未検知率を評価した。ここで、誤検知率は安全な状況にもかかわらず発報したフレームの割合、未検知率は点字ブロックを超えた接近で発報しなかったフレームの割合と定義した。試験結果として、誤検知率は 0.02% であり、未検知率は 3.80% であった。未検知の中で最多のケースは、白杖の見逃しであった。ただし、白杖については、人物と同時に存在するケースが通常であり、人物を検知できれば、安全確認を支援は可能であると考えられる。そこで、白杖を評価対象から除くと、誤検知率は 0.02% であり、未検知率は 1.75% であった。さらに、学習データの量が多い人物に限ると、誤検知率は 0.00%、未検知率は 0.36% であり、5 フレーム（0.5 秒）以上の未検知は 1 件も存在しなかった。車いすやベビーカーも人物と同程度に学習データを増やすことで精度向上が期待できる。

6.2 実映像による乗降人数カウント精度評価

映像データを用いた乗降人数カウントの性能評価を行った。815 系車両が運用されている豊肥本線（熊本～肥後大津）の 558 駅停車分の映像データを使用した。この映像データには、始発から終電の時間帯、天候（晴・曇・雨・雷雨）、屋内外、駅構造（単式、島式）等の条

表 2 乗降人数カウントの扉ごとの正解率

	カウント正解率 (乗車)	カウント正解率 (降車)
手前扉	95.19%	95.86%
中央扉	95.72%	84.49%

件が無作為に含まれている。815 系車両は 3 扉であるため、カメラから近い順に手前扉、中央扉とする（図 10 中ではそれぞれ、扉 1、扉 2 を指す）。この場合、前後にカメラがあるため、中央扉については 2 重でカウントすることとなる。中央扉に関しては、カメラ 2 台で計測された乗降人数から、平均や最大値等の統計量で推定する。今回は平均値を採用した。全映像で目視と装置によるカウント結果をそれぞれ累計し、正解率（装置カウント数/目視カウント数）を扉ごとにまとめたものを表 2 に示す。

表 2 より、中央扉の降車を除いて正解率は 95% 以上である。一方、中央扉の降車のみ正解率は 84% 程度となり、ほかに比べて誤差が大きいことが確認できる。これは、Bytetrack のアルゴリズムの影響であると考えられる。Bytetrack はこれまで検知できていた対象が一時的に遮られた際にも正しく検知できる効果はあるが、最初に出現する際に遮られて検知ができない場合には対応していない。したがって、中央扉の降車は、最初の出現時に遮られる可能性が高く、見逃すケースが多いと考えられる。

全体的な精度としては、駅ごとに乗車と降車を区別して高頻度のカウントが可能であることを考慮すると、実用上は活用可能な精度と考えられる。

7. まとめ

車両側面カメラを活用したさらなる安全確認の高度化を目的として、安全確認支援装置を開発した。本装置は、カメラ映像からホーム上の旅客の接近を画像処理技術によりリアルタイムで検知し、乗務員へ通知することが可能である。また、本装置は安全確認のみではなく、乗降人数カウントの機能も備えており、停車駅ごとにカウントを自動で実行可能である。

今後は、実用化に向けてユーザインタフェース等の最終調整を行う予定である。

謝 辞

本研究にあたり、九州旅客鉄道株式会社、八幡電気産業株式会社の関係者の皆様には多大なご協力をいただいた。この場を借りて厚くお礼申し上げる。

文 献

- 1) T.-Y. Lin, M. Maire, S. Belongie, J. Hays, P. Perona, D. Ramanan, P. Dollár, C.L. Zitnick: Microsoft coco: Common objects in context, Proceedings of the European Conference on Computer Vision, pp.740-755, 2014.
- 2) 吉野純樹, 長峯望, 向嶋宏記, 合田航: AR マーカーを用いた車両側面カメラ用画像変換パラメータの算出手法, 交通・電気鉄道研究会, TER-21-067, 2021
- 3) David A. Forsyth, et.al: コンピュータビジョン, 共立出版, 2017
- 4) Yifu Zhang, Peize Sun, Yi Jiang, Dongdong Yu, Zehuan, Yuan, Ping Luo, Wenyu Liu, and Xinggang Wang. BYTETrack: Multi-object tracking by associating every detection box. arXiv preprint arXiv: 2110.06864, 2021.