

投影型シースルーダッシュボードを用いた 車輪軌道の可視化による運転者視覚支援

笹井 翔太[†] 北原 格[‡] 亀田 能成[‡] 大田 友一[‡]

[†] [‡] 筑波大学 大学院システム情報工学研究科 〒305-8573 茨城県つくば市天王台 1-1-1

E-mail: [†] s1420788@u.tsukuba.ac.jp, [‡] {kitahara, kameda, ohta}@iit.tsukuba.ac.jp

あらまし 本研究では、投影型複合現実技術を用いて、運転車両前方の死角である道路平面の映像をダッシュボード上にシースルー映像として提示し、映像中に仮想の車輪軌道を重畳する手法を提案する。シースルー映像の提示によって、運転者は提示映像と周囲の環境との位置関係を迅速に把握することができる。また、重畳提示された車輪軌道は、自車両の車幅や路端と車輪との位置関係を把握するための手がかりとなり、道幅の狭い道路における脱輪、巻き込み、対向車とのすれ違い時の接触といった事故を防ぐ効果が期待できる。実際に構築した提案システムを用いた評価実験により、有効性を検証する。

キーワード 複合現実感, 隠消現実感, 高度交通システム (ITS), プロジェクタ, 幾何学的補正

1. はじめに

自動車には、その構造上、運転者が直接視認できない死角領域が存在し、安全運転を妨げることが指摘されている。特に、前輪付近の死角領域は、道幅の狭い道路における脱輪、巻き込み、対向車とのすれ違い時の接触といった事故の原因となることが知られている。自動車の運転をより安全なものにするためには、自車両の周囲の情報をより多く、かつ、理解しやすく運転者に提示する必要がある。このような問題に対する既存手法として、車両のサイドミラーに設置したカメラで車両周辺の死角領域を撮影し、車両を俯瞰した映像を合成・提示する手法が存在する[1]。しかし、俯瞰視点の仮想カメラと運転者の視点位置が異なるため、両者の見え方に大きな差異（幾何学的な不整合）が生じる。その結果、提示映像中の世界と車両周囲の実世界との位置関係を迅速に把握するためには、一定の習熟を要する。このような問題を解決するため、現実世界に仮想世界の情報をシームレスに合成する複合現実感（MR：Mixed Reality）を用いた提示手法の研究が行われている[2]-[7]。

本研究では、図1に示すように投影型MR提示技術を用いて、自車両前方の死角領域を撮影した映像をダッシュボード上に提示することにより、シースルーダッシュボードを実現する。さらに、その上に車輪軌道CGモデルを重畳提示することにより、安全運転支援手法を提案する。提示映像と車両周囲の実世界との幾何学的な整合性を再現したシースルー映像を提示することにより、死角領域と車両との位置関係を迅速かつ的確に理解可能となることが期待される。さらに、車輪軌道CGモデルを重畳することで、路端と車輪の位

置関係や自車両の車幅を運転者が把握しやすくなり、円滑なすれ違いや、脱輪や巻き込み事故の防止効果が期待できる。

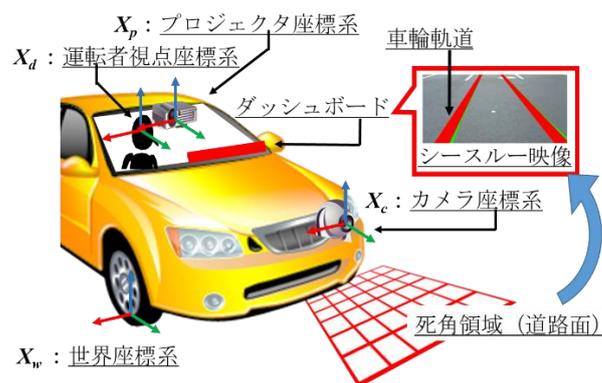


図1 投影型シースルーダッシュボードを用いた車輪軌道の可視化

2. 関連研究

日産自動車株式会社のアラウンドビューモニター[1]は、車両の前後左右4方向に取り付けたカメラで車両周囲の死角領域を撮影し、俯瞰視点からの見え方に変換した4枚の画像をつなぎ合わせて提示することで、車両を真上から眺めたような映像を運転者に提示する。運転者の視点位置と提示映像を撮影した仮想カメラの位置が一致していないため、提示映像中の世界と車両周囲の実世界の見え方が大きく異なり、結果として周囲の状況を迅速かつ的確に把握するためには、一定の習熟を要する。

吉田ら[7]は、車両外壁に設置したカメラで死角領域

を撮影し、運転者視点から内壁越しに死角領域を観察したような映像に変換した後、車両内壁に投影することで、内壁越しに死角領域を観察するシステムを構築した。運転者視点と仮想カメラの位置が一致した（幾何学的整合性が再現された）シースルー映像の提示に成功しているが、路端と車輪との位置関係や自車両の車幅を迅速に把握するための情報は十分とは言い難い。

3. 投影型シースルーダッシュボードを用いた車輪軌道のMR提示

図1に提案手法の構成を示す。世界座標系を X_w 、ビデオプロジェクタ座標系を X_p 、カメラ座標系を X_c 、運転者視点座標系を X_a とする。車両のフロントグリルに設置したカメラで前輪付近の死角領域（道路面）を撮影する。提示映像と周囲の実世界との幾何学的整合性が再現されるよう射影変換を施し、観察者視点の近くに固定したビデオプロジェクタでダッシュボード上に投影する。以上の処理により、ダッシュボード越しに死角領域を観察するようなシースルー映像の提示が実現される。ダッシュボード上に再帰性反射素材を貼り付けることにより、昼間でも鮮明な投影映像提示が可能である。また、ハンドルに取り付けた加速度センサの観測値から操舵角を推定し、前輪および後輪軌道を算出する。算出結果に基づいて車輪軌道のCGモデルを生成・レンダリングし、シースルー映像に重畳する。

3.1 投影映像から運転者視点映像への射影変換

ビデオプロジェクタの投影中心と運転者視点 (X_p と X_a の原点) が異なるため、投影映像と運転者視点映像の間には、ダッシュボードの3次元形状によって見え方の差異が生じる。吉田ら[7]はヘッドマウントプロジェクタとハーフミラーを観察者の頭に装着し、ビデオプロジェクタの投影中心と観察者視点を一致させることで、歪みが生じない投影映像を提示している。しかし、ヘッドマウントプロジェクタとハーフミラーを装着しての運転は、安全性の点で問題となる。本研究では、ビデオプロジェクタを観察者視点の近くに固定し、ビデオプロジェクタへの入力画像に補正を施すことで歪みを軽減する。それでも生じる見え方の差異は、投影映像に2次元射影変換を施すことにより補正する。ダッシュボードは、一般的に複雑な3次元形状を有するため、図2に示すように、ダッシュボード形状を幾つかの代表的な平面（分割平面）で近似し、各平面に対して2次元射影変換処理を施す。

直交格子パターンをダッシュボード上へ投影し、運転者視点位置に設置したカメラで運転者視点映像 I_a を撮影する。 I_a 中の格子パターンの歪み具合から、 I_p 中

で平面分割する領域を決定する。

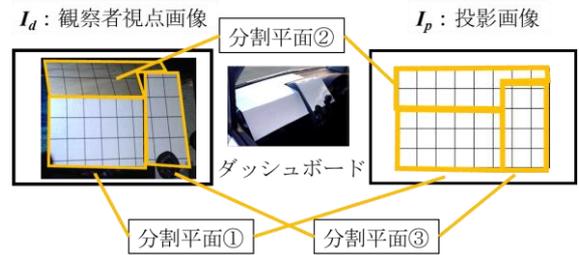


図2 投影映像中における分割平面の決定

図3に示すように、ある分割平面において、観察者視点映像 I_a と投影映像 I_p の対応点を4点以上検出し、 I_a から I_p への2次元射影変換行列 H_1 を推定する。次に、 H_1 を用いて I_p を射影変換し I_p' を生成する。この I_p' をプロジェクタを用いて投影することにより、運転者からは、見え方の歪みが補正された映像 I_a' が観察される。同様の処理を全ての分割平面に対して行うことにより、運転者からは、ダッシュボード上に1枚の平面ディスプレイが表示されているように見える。以降、この平面ディスプレイを仮想ディスプレイと呼ぶ。

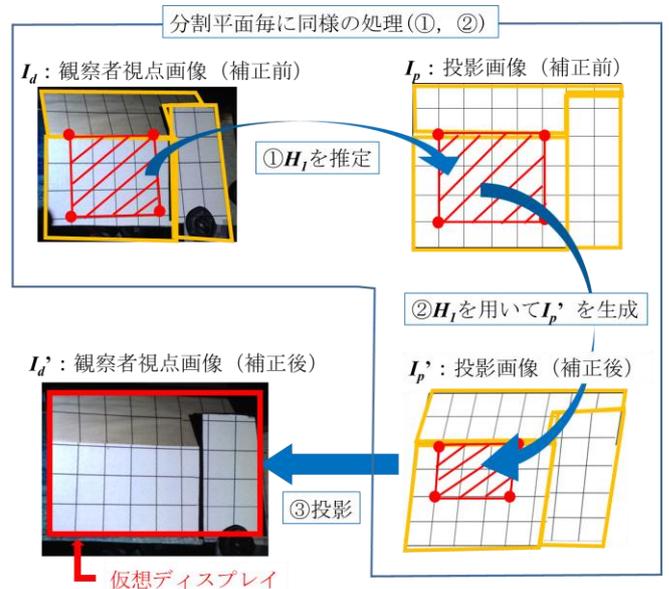


図3 投影映像から運転者視点映像への射影変換 H_1

3.2 撮影映像から運転者視点映像への射影変換

死角領域を撮影するために自車両のフロントグリルに取り付けたカメラ（死角撮影カメラ）の位置と運転者視点位置 (X_c と X_a の原点) も一致させることが難しいため、撮影映像 I_c と運転者視点映像 I_a の間には見え方の差異が生じる。この差異が、提示映像と直接観察（直視）する周囲の実世界との間に生じる幾何学的な不整合である。撮影対象シーンの3次元形状が既知

であれば、見え方の差異の補正処理が可能であるが、車両走行に伴い刻々と変化するシーンの形状を実時間で取得する必要があり、システム実現時において機材・処理コストの点で問題となる。本研究では、観察対象を道路面に限定することにより、高速かつ正確な見え方の補正処理を実現する。

図5に処理の流れを示す。図4に示すように、実際の道路面上の点 R_n ($n=[1, \dots, 4]$) が、 I_c 中で透視投影される位置 R'_n と、 I_d 中の仮想ディスプレイ上に透視投影される位置 R''_n を取得する。これら4点の対応点情報を用いて、 I_c から I_d への2次元射影変換行列 H_2 を推定する。

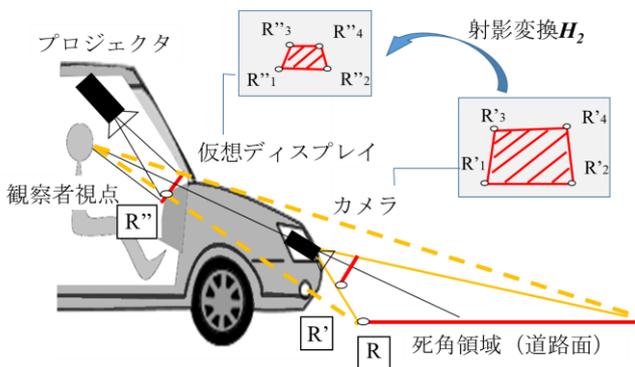


図4 撮影映像から運転者視点映像への射影変換

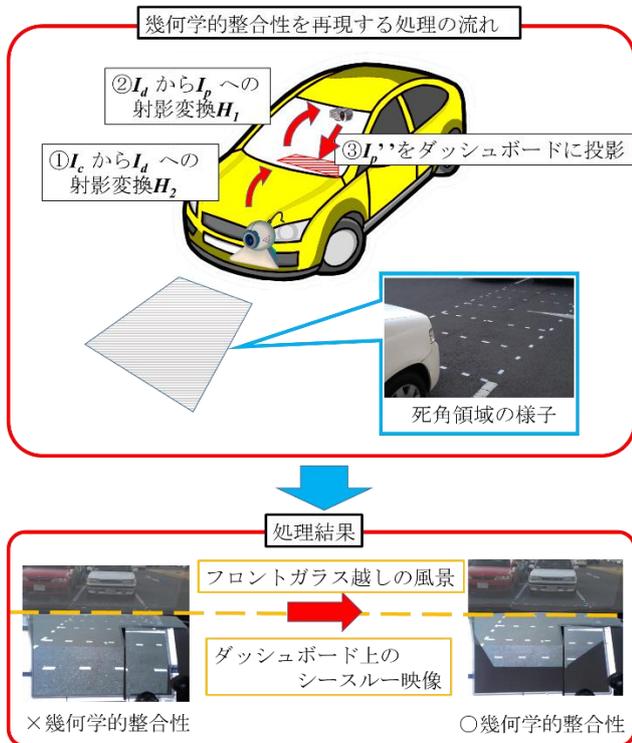


図5 幾何学的整合性の補正処理と結果

図5に補正処理の結果を示す。撮影映像 I_c に対して H_1 , H_2 を合成した2次元射影変換を施した映像 I_p'' を、プロジェクタで投影することにより、運転者視点映像における現実の道路面と死角撮影カメラで撮影された道路面の幾何学的整合性が再現され、ダッシュボード越しに死角領域（道路面）を観察したようなシーンスルー映像の提示が可能となる。

3.3 車輪軌道の算出と重畳

運転車両のハンドルに取り付けた加速度センサにより操舵角を推定し、前輪および後輪の軌道を算出する。OpenGL を用いて車輪軌道の CG モデルを生成し仮想ディスプレイ映像に重畳した後、ダッシュボード上に投影する。図6に低速走行時の定常旋回の各車輪における回転半径を示す。旋回速度が上がった場合、遠心力によって横すべりが発生し、回転半径が変化することが考えられるが、本システムでは、利用シーンとして道幅の狭い道路を想定しているため、車両は低速走行すると仮定し、遠心力による横すべりの影響は無視する。

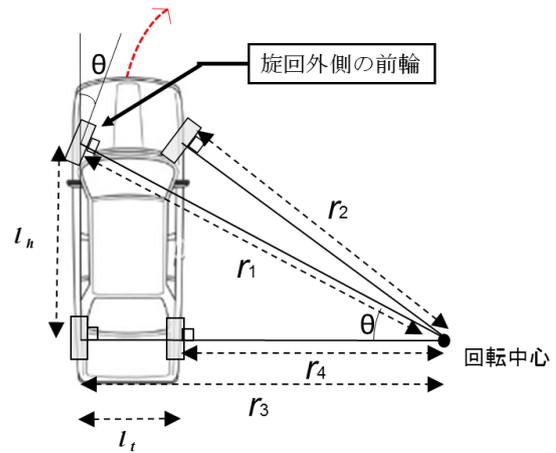


図6 低速走行時における定常旋回の回転半径

旋回時における旋回外側の前輪の舵角を θ [度]、その前輪の回転半径を r_1 [m]、前輪中心と後輪中心の長さであるホイールベースを l_h [m] とすると、その関係は以下の式(1)のように表すことができる。

$$\sin(\theta) = \frac{l_h}{r_1} \dots (1)$$

図6に示すように各車輪の回転中心は一点で交わっているため、各車輪の回転半径 (r_2, r_3, r_4) については、前輪同士または後輪同士の幅であるトレッドの

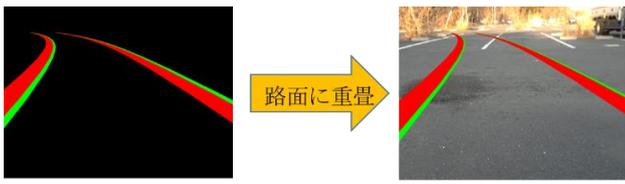
長さを l_t [m] とすると、以下の式(2), (3), (4)のように表すことができる。

$$r_2 = \sqrt{r_4^2 + l_t^2} \quad \dots (2)$$

$$r_3 = r_1 \cos(\theta) \quad \dots (3)$$

$$r_4 = r_3 - l_t \quad \dots (4)$$

仮想ディスプレイ映像中に車輪軌道の CG モデルを重畳するためには、世界座標系 X_w とカメラ座標系 X_c 間の射影変換を求める必要がある。本システムでは、3次元位置と大きさが既知のビジュアルマーカを道路面上に設置し、座標変換行列 D を推定する。推定した D を用いて、世界座標系 X_w からカメラ座標系 X_c に CG モデルを変換したのち、 I_c 中にレンダリングする。図7に示すように、前輪軌道と後輪軌道を見分けやすくするため、前輪軌道を緑色、後輪軌道は反対色である赤色でレンダリングする。



車輪軌道のCGモデル { 緑線・・・前輪軌道
赤線・・・後輪軌道

図7 路面への車輪軌道のMR提示結果

4. 評価実験

本節では、道幅の狭い道路における円滑なすれ違いや、脱輪や巻き込みといった事故防止に対する提案手法の有効性に関する評価実験について述べる。

4.1 システムの構築

提案手法を以下の機材を用いて図8のように構築した。処理用PCとしてソニー社製ラップトップPC (VPCS11AFJ (CPU: Intel Core i5 2.53GHz, RAMメモリ: 4.00GB)) を使用した。死角撮影用のUSBカメラとしてLogicool社c270(解像度: 1280画素×720画素, 水平画角: 60°) を使用し、ビデオプロジェクタにPLUS社U4-136(パネル画素数: 1024画素×768画素) を使用した。ハンドルの操舵角を推定するため、富士通社Android端末ARROWS Z ISW11F(OS: Android 4.0.3, CPU: Texas Instruments OMAP4430 1.2GHz, RAMメモリ: 1GB) に搭載された加速度センサを使用した。Android端末により取得されたハンドルの操舵角は、Bluetooth通信により処理用PCへと送信される。シス

テムの動作の様子を図9に示す。幾何学的な整合性が再現されたシースルー映像の提示によって、死角領域の路面上に描かれた白線をダッシュボード上に観察することができる。また、車輪軌道のCGモデルを重畳することで、路面上の白線と自車両の車輪との位置関係を迅速に把握できると思われる。



図8 システムの構成

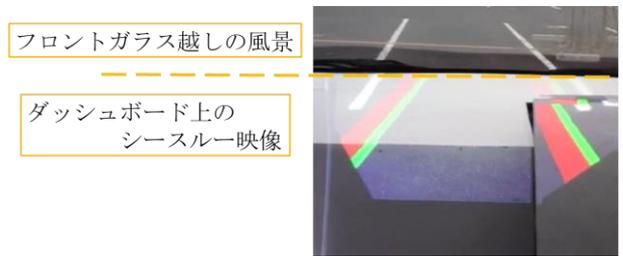


図9 システムの動作様子

4.2 実験手順

図10に示すように、脱輪や巻き込みの防止効果を検証するための直角クランクコースと、円滑なすれ違いを検証するために障害物を設置した直進コースを用意した。

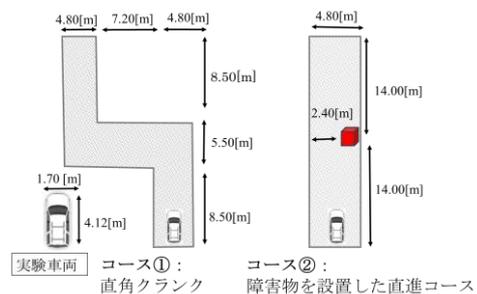


図10 実験車両と走行コースの寸法

それぞれのコースにおいて、路端と車輪の位置関係や、車幅の迅速な理解に対する提案手法の効果を検証するため、車輪軌道を重畳したシースルー映像と車輪軌道を重畳しないシースルー映像を用意した。表 1 に示すように実験参加者一人あたり 4 回の試行を行った。

表 1 試行の組み合わせ

	車輪軌道	走行コース
試行 1	なし	直角クランク
試行 2	あり	直角クランク
試行 3	なし	障害物を設置した直進コース
試行 4	あり	障害物を設置した直進コース

本実験は、16 名の実験参加者に対して実施した。観察環境を統一するために、実験参加者は実験者が運転する車両の助手席に座り、各試行における提示映像を観察する。各試行を終える毎に表 2 に示す質問項目に対して 5 段階のリッカート尺度に従って回答するよう指示した。

表 2 アンケートの質問内容

	質問項目
1	自車両の車幅が理解できましたか
2	道路端とタイヤの位置関係が理解できましたか

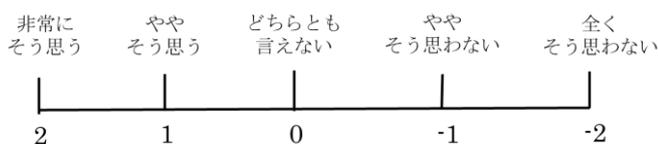


図 1 1 5 段階のリッカート尺度

実験参加者の慣れがアンケート結果に与える影響を軽減するため、8 名の実験参加者には車輪軌道を重畳したシースルー映像を先に提示する順番（試行 2, 1, 4, 3 の順番）で実験を行い、残り 8 名には車輪軌道を重畳しないシースルー映像を先に提示する順番（試行 1, 2, 3, 4 の順番）で実験を行った。

4.3 実験結果と考察

アンケートの質問 1 および質問 2 に対する評価値の平均値と標準偏差をそれぞれ図 1 2 と図 1 3 に示す。

車輪軌道の重畳による提案手法の有効性を検証するため、Wilcoxon の符号付順位和検定を行った。質問 1 の結果において、直角クランクのコースで車輪軌道を重畳しない試行 1 と、車輪軌道を重畳した試行 2 の間には有意水準 1% で有意差が認められた。同様に、障害物を設置した直進コースで行った試行 3 と試行 4 の間にも有意水準 1% で有意差が認められた。質問 1 の結果から、車輪軌道の重畳によって自車両の車幅が迅速に理解できるようになったと考えられる。質問 2 の結果においても、試行 1 と試行 2 の間、試行 3 と試行 4 の間に有意水準 1% で有意差が認められたため、路端と車輪の位置関係が迅速に理解できるようになったと考えられる。

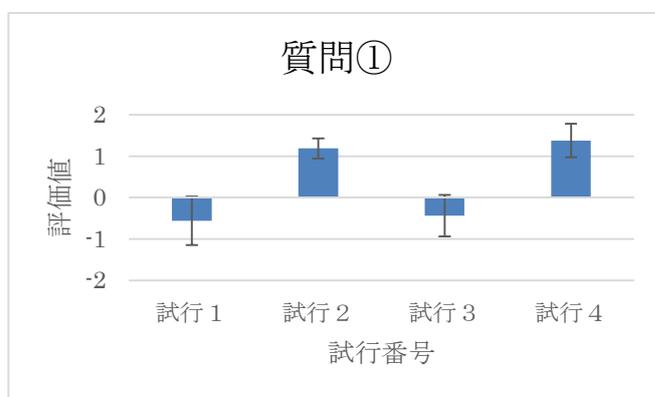


図 1 2 質問①に対する回答結果

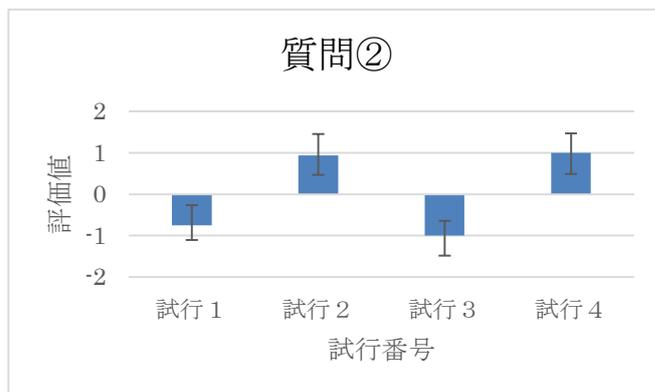


図 1 3 質問②に対する回答結果

質問 1 と質問 2 の結果において、直角クランクのコースと障害物を設置した直進コースでともに有意差が認められたことから、提案手法が道幅の狭い道路における脱輪や、すれ違い時の接触といった事故防止に有効であると考えられる。しかし、「ハンドルを大きく回した際、提示映像から車輪軌道が見切れてしまう」という回答が得られたことから、小さい旋回時の巻き込みの防止は困難であると考えられる。今後、提示範囲

を広げることでこの問題を解決する。

5. まとめ

投影型 MR 提示技術を用いてダッシュボードにシー
スルー映像を提示することにより死角領域の観測を可
能とし、仮想の車輪軌道を重畳する手法を提案した。
シースルー映像中に車輪軌道を重畳することで、路端
と車輪の位置関係や自車両の車幅の迅速な理解を支援
する。提案手法のシステムを構築し、評価実験を行っ
た結果、道幅の狭い道路における脱輪や、すれ違い時
の衝突といった事故の防止に提案手法が有効であるこ
とを確認した。

文 献

- [1] 鈴木 政康, 鈴木 政康 “アラウンドビューモニ
タの開発 (トピックス)” 日本機械学会誌,
vol.111, p.332, Apr.2008
- [2] 長谷川 洵希, 上間 裕二, 羽田 成宏, 坂井 誠,
稲見 昌彦 “再帰性投影技術による車両 A ピラ
ーの透明化に関する検討” 日本バーチャルリアリ
ティ学会大会論文集, P.43-46, Sept.2013
- [3] 澤野 弘明, 岡田 稔, “車載カメラによる実時間画
像処理とその AR 技術に基づく表示方式によるカ
ーナナビへの応用”, 芸術科学会論文誌, Vol.5, No.2,
P.57-88, (2006)
- [4] Hye Sun Park, Min Woo Park, Kwang Hee Won,
Kyong-Ho Kim, and Soon Ki Jung, "In-Vehicle AR-
HUD System to Provide Driving-Safety Information,"
ETRI Journal, Vol.35, No. 6, P.1038-1047, Dec.2013
- [5] 安藤 友二, 齋藤 綾亮, “投影型シースルーピラー
のための画像生成・補正”, 電子情報通信学会技術
研究報告.MVE 96-109, P.51-55, Jan.2009
- [6] Masahiko Inami, Naoki Kawakami, Dairoku
Sekiguchi, Yasuyuki Yanagida, Taro Maeda, and
Susumu Tachi “Visuo-haptic display using head-
mounted projector” Virtual Reality, Proceedings.
IEEE, P.233-240, Mar.2000
- [7] Takumi Yoshida, Kensei Jo, Kouta Minamizawa,
Naoki Kawakami and Susumu Tachi “A Display
System for Vehicle Blind Spot Information Using
Head Tracked Retro-reflective Projection Technology”
The Journal of The Institute of Image Information and
Television Engineers vol.63 No.6 P.801-809,
Jan.2009