

人の奥行き知覚と車載測距装置の特性比較【加筆訂正】

The comparison between characteristics of human depth perception and that of in-vehicle distance-measuring equipment

原文：MICROOPTICS NEWS Vol. 36 No. 3, pp. 31 – 36 (2018)

2018 年 9 月 5 日 第 149 回微小光学研究会

桑山 哲郎 Tetsuro Kuwayama

元 キヤノン株式会社 【千葉大学工学部非常勤講師 「画像技術史」担当】
Former Canon Inc. 【Part-time lecturer, Chiba University】

E-mail: tkuwa@ga.catv-yokohama.ne.jp

あらまし 自動運転車を成り立たせるための重要な技術要素として、車に搭載する測距装置に対し注目が集まっている。報告者がこれまで行ってきた、画像の技術史の講義の経験に基づき、人の奥行き知覚と車載測距装置の特性を比較する。

1. はじめに

自動車の自動運転が技術的にも社会的にも近い将来の実現を目指し着実に進展していることを反映し、車載の測距装置に関する話題が多く見かけられるようになってきた。報告者は、大学担当している画像技術史の講義の中で、人の感覚・知覚特性と工学としての画像のシステムの関係を教えてきている。

3D 画像のいろいろな技術には、人の奥行き知覚が深く関連している。また、これまで各種の 3D 形状を、計測する装置が研究・実用化されてきた流れの中で、自動車に搭載する測距装置は一つの新しい分野を形成しているように感じられる。この報告では、人の奥行き知覚と装置の関連に加え、歴史的な画像機器の発展との関連も指摘したい。実際に機器を扱ってはいない部外者としての見方であることをご容赦いただきたい。

2. 車載測距装置と歴史的な装置の対比

現在使用されている、あるいは研究中の測距装置は、ほぼすべて昔からの光学機器の形を受

け継いでいると言える。ミラーなど各光学部品の機能はそのままであるが、数値で表した性能は桁違いに向上している。以下、外見だけでなく分かる伝承されている光学系の例をあげる。

● 角錐形のポリゴンミラーの利用

図 1 に、レーザー光のスポットを 2 次元走査し、対象物の距離を検知する LiDAR 光学系の一例を示す。赤外の半導体レーザーからの光は、角錐形のポリゴンミラーで反射されて偏向され、対象物に向かう。図では、6 面の反射面の倒れ角が変えられていて走査位置を変えているが、細いスリット形状の光束で照明、1 次元の光検出器アレイで光検出を行う方式などが用いられている。



図 2 角錐形のポリゴンミラーを用いる
プラクシノスコープ(19 世紀中ごろ)

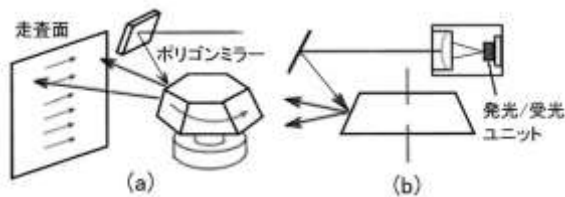


図 1 ポリゴンミラーを用いる LiDAR の光学系の例

角錐の形のポリゴンミラーは、古くから画像を扱う光学系に登場する。図 2 は映画発明以前の動画装置で、円板上に描かれた表示像はポリゴンの反射面を介して観察される。ポリゴン反射面は回転軸と 45 度の角度に配列され、円

板とポリゴンを一体に回転する際にも、像の中心軸は機械的な回転軸上に静止している^{1, 2)}。

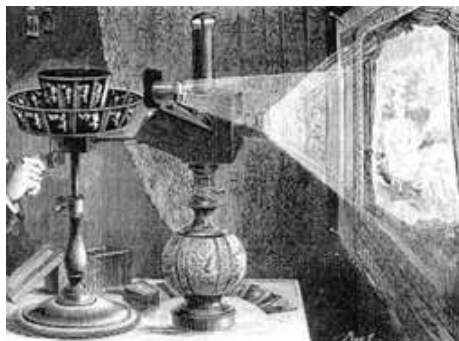


図3 映写型のプラキシノスコープ(1888年)

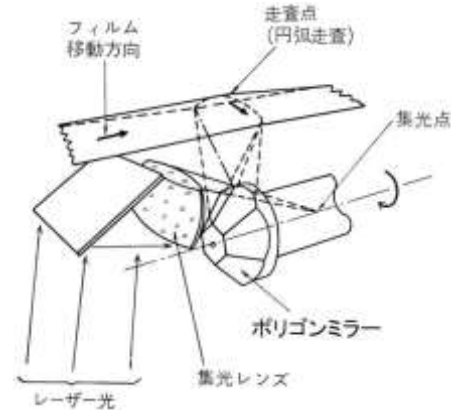


図4 マイクロフィルムレコーダー(1960年代)

角錐形のポリゴンミラーは、19世紀終わごろから徐々に光学機器に登場する。図3は、映画発明前の時代の動画映写装置で、また図4はレーザー光スポットでマクロフィルム感光材料に記録を行う装置である。反射の法則を用い、すべて同一の原理に基づいている。

● 立体物を光スポットで走査

初期のテレビジョンにおいて、スタジオでの撮像装置では、現代のLiDARと相似の手法が用いられていた、図5は、2次元(ラスタ)走査を行うために用いられ、現在でも走査顕微鏡に用いられているニポー円板である。有名な「イ」の文字は、透明基板(雲母板)描かれ、円板上の穴を透過する光束を透明板上に結像し、テレビ信号を得ていた。次の段階のスタジオ内撮像では、アナウンサーや演者姿を撮影するに当たり、暗黒のスタジオで光スポットを走査、人物の近くに配置した光電子増倍管(フォトマルチプライヤー)で拡散反射された光を検出していた(図6)。1930年頃から一定期間実用的に使用されたこの方法は、フライングスポット・テレビジョンと呼ばれた。

現在の多くのLiDARでは、赤外のレーザー光のスポットを用いて3D物体を走査しているが、その原点は初期のテレビジョンにある。取

り上げた以外にも、現在の測距装置の中には歴史的な光学配置が数多く受け継がれている。

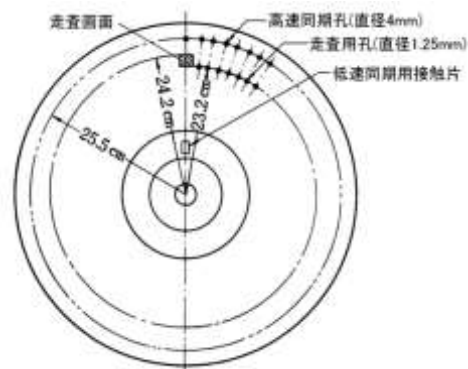


図5 ニポーの円板(1926年)

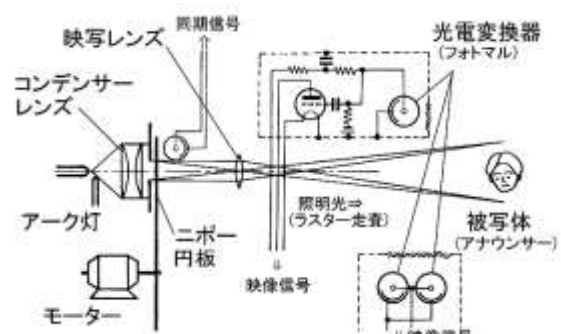


図6 フライングスポット・テレビジョン(1930年代)

表 1 奥行知覚の手がかり^{5, 6)}

単眼視	A 調節{水晶体調節, 焦点深度}	<5m
	B 空気透視{コントラスト低下, 青色色}	
	C 色{進出色-後退色}	
	D 網膜像の大きさ* {既知の物体}	<500m
	E 線透視(図法) {消点←平行線}	
	F 均一模様{密度勾配}	
	G 不均整構図{対称性欠除}→立体反転図形	
	H 重なり合い	
	I 光と影の分布{照明条件の判断}	
	J 単眼運動視差{多方向観察}	<300m
↓	K 視野{画枠効果除去}→大画面表示	>50m
両眼視	L 両眼視差{前後弁別}→2 眼式立体表示	<250m
同時視	プルフリット効果【特殊な奥行効果】	
単一視	M 輻輳(ふくそう) {眼球筋肉緊張}	<20m

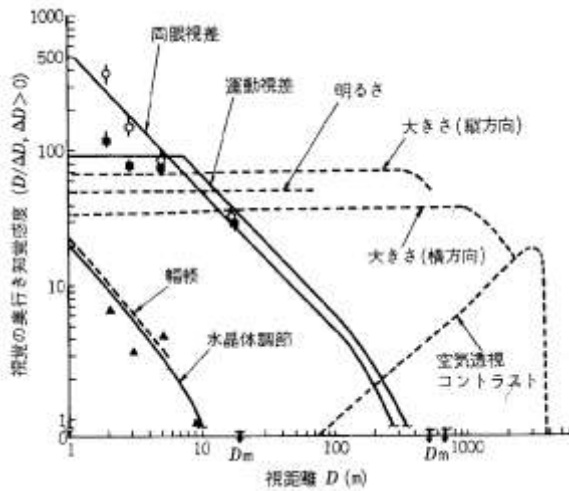


図7 奥行知覚感度の視距離との相関⁴⁾

3. 人の奥行き知覚

人が実世界および3D画像表示機器に向かった際に、奥行きを感じる手がかりを表1に示す。項目として取り上げると、両眼が用いられるのは両眼視差と輻輳の2項目だけである^{5, 6)}。人が3D物体に向かった際には、これらの多くの要素は同時に並行して働くが、どの奥行き手がかりの影響が大きいかは、対象物までの距離と対象物が「何である」かに左右される。図7は、人から対象物までの距離(視距離)と、奥行検出感度の関係を表したものである。横軸、縦軸はともに対数目盛としている。グラフより視距離7mで両眼視差および運動視差の検出感度が90と読み取れるが $7 \div 90 = 0.078$ つまり7.00mと7.078mの視距離にある対象物が弁別できることを表している。明るさ、大きさなどの要素は破線で表示している。これは検出感度が物体の外見の影響を大きく受けるためである。以下、実例を示し人の奥行検出について解説する。



図8 線透視の例

●線透視による奥行検出

図8は、強い線透視の例である。現場では、奥に向かった平行線の建物の構造が強い奥行き感を与えるが、画像を大きな寸法で表示するだけで、強い奥行き感が生じる。

●密度勾配から生じる奥行き効果

表面に均一な模様を持つ平面を傾いた方向から観察すると、網膜像に密度勾配を生じ奥行き感が発生する(図9)。

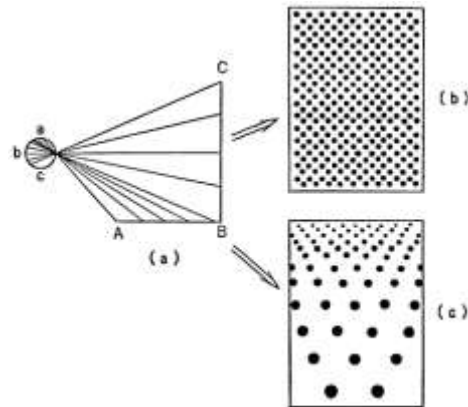


図9 均一な模様の密度勾配から生じる奥行き効果
(a)眼球光学系・網膜像との関係
(b)正対する面BCは奥行き感なし
(c)観察方向に対して傾いたAB面は奥行き感あり

●掩蔽(手前の物が奥の物を隠す)の効果

手前の物体は奥の物体を隠す(掩蔽, オクルージョン)ことから、線画でも、掩蔽関係がはっきり分かる境界線が描かれていると前後の判別がつく。

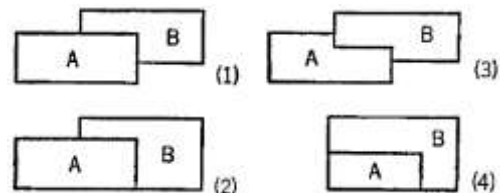


図10 掩蔽による前後判別 (1)(2)では前後関係がはっきりしているが(3)(4)でははっきりしない



図11 「お面の裏側」の錯視(右下から照明)

●既知の知識による凹凸判断

物体が何であることを認識すると、凹凸がトップダウン情報処理で決まる。お面を裏向きに置き、右下から照明すると凹凸が反転して知覚される(図 11)。この錯視は特別に「ホロウマスク錯視 (Hollow Mask Illusion)」と呼ばれる。画像では錯視の効果は大きいですが、3D 物体である石膏による凹面顔のモデルを用いても、強い錯視を生じて顔が手前に飛び出して感じられる。

以上、人の奥行知覚に関しては詳細に解説した書物^{5, 6)}があるのだが、実際の光景や画像に対しては、奥行判別は体調や個人差などの変動要因も加わることから、大変複雑な状況を生じる。

4.車載測距装置を巡る最新情報

車載用測距装置では、特に LiDAR (Light Detection and Ranging, Laser Imaging Detection and Ranging, 「光検出と測距」あるいは「レーザー画像検出と測距」)に関する技術と企業動向が次々と発表されている。この文章を執筆中にもニュースが次々と報じられている。同時代の技術史の記録者として、効率良く系統的に情報が入手できるサイトのトップページの URL アドレスを2つ紹介し、その中で車載用測距装置に関連したタイトルを新しいものから配列する。なおニュースあるいはツイッターのタイトルは、各社の著作物である。

●オプトロニクスオンライン

月刊オプトロニクスの編集部が運営するオンラインニュースである。2018年4月以降の記事からピックアップし表2に示す。

<http://www.optronics-media.com/>

表2 オプトロニクスオンラインより

7月30日	Cepton Technologies, 小糸製作所に LiDAR のサンプルを供給
7月24日	リコーインダストリアルソリューションズ, 路面状態まで捉える ADAS 向け 3D カメラを発売
7月13日	Cepton, 独自方式の LiDAR をデモ
7月4日	パナソニック, TOF 方式長距離画像センサーを解説
7月4日	芝浦工大, LiDAR の識別性能を向上させる技術を解説
6月29日	自動運转向け LiDAR 市場, 2030 年に 4,9590 億円へ 矢野経済研究所 世界市場調査
6月19日	パナソニック, 高感度 TOF 方式長距離画像センサーを開発
6月7日	Quanergy, ソリッドステート LiDAR を発表
5月25日	【人とくるま】海外ティアワン, フ

	ラッシュ LiDAR のロードマップ発表
5月24日	【人とくるま】Valeo, 新型 LiDAR を世界初公開
5月24日	【人とくるま】HELLA, レーザーヘッドランプを展示
5月16日	OmniVision, 自動運转向け視線検知用イメージセンサー発売
5月10日	オン・セミコンダクター, LiDAR センサー企業を買収
4月24日	東芝, LiDAR の信頼性を向上するロジックを開発
4月10日	ADAS 用車載デバイス市場, 2017 年に 1 兆円の大台を突破 富士キメラ総研【市場調査】
4月4日	パイオニアの LiDAR, NVIDIA の SDK に対応

●自動運転ラボ編集部ツイッターより

自動運転業界の最新情報を発信しているサイトで、ツイッターには注目の話題が多数アップロードされている。多数の項目から一部を抽出し表3に示す。Copyright © Strobo Inc.

<https://jidounten-lab.com/>

表3 自動運転ラボ編集部ツイッター

8月6日	イーロン・マスク氏の AI 戦略 EV 自動運转向け, いやいずれ脳にも? テスラが自社開発
8月7日	パイオニア社の走行空間センサー, NVIDIA の自動運転用ソフトウェア開発キットに対応
8月8日	パイオニアが自動運转向け 3D-LiDAR を来月発売 高精度地図の HERE と提携強化
8月2日	国交省が動いた...AI自動運转向けに 3D 道路データ収集 最新センサーで
7月31日	孫さん出資の 16 眼カメラ, AI 自動運転での応用期待 米スタートアップが開発
7月26日	触れずにわかる...リコーとデンソー, 路面解析で新技術 AI 自動運転への活用期待
7月15日	遂に京セラ参戦!! AI 自動運转向けの LiDAR, 提案強化 自動車メーカー向けに
7月11日	1 秒で演算 320 兆回...ボッシュとダイムラー, 自動運転車にエヌビディア製 AI 採用
7月6日	ザリガニ, LiDAR に超進化もたらす 自動運転界に貢献, 芝浦工業大で新技術
7月6日	見えすぎ...パナが夜間無敵の新センサー 自動運転で活躍, 距離情報を画像化

7月4日	浪江町の3D地図化完了！会津ラボが公道で自動運転実証へ
7月3日	急拡大！2030年のLiDAR市場、現在の200倍に5000億円規模、自動運転車普及で矢野経済研究所
6月29日	中東が生んだ天才技術者…モバイルアイ成功劇と自動運転 インテルなぜ買収？
6月21日	自動運転レベル0～5まで、6段階の技術到達度をまとめて解説
6月20日	続・神童CEOの快挙 LiDAR企業ルミナー・テクノロジーズ、トヨタに続きボルボと取引
6月18日	常識覆す…自動運転の目“LiDAR”に不要論 浅田麻衣子/レバトロン(株)代表取締役
6月18日	立体認識技術者、創業2年で6億円調達 自動運转向けステレオカメラ開発 実吉敬二 ITD lab (株)
6月3日	自動運転の最重要コアセンサーまとめ LiDAR, ミリ波レーダー, カメラ

5. 車載用測距装置と自動運転の関係

これまで取り上げた車載用のセンサー・測距装置の話題にだけ注目していると、現在実際に搭載されているセンサー、今後数多く搭載されるセンサーの全体像を見誤る恐れがある。個別に説明すると大部になるので、総合的な報告⁷⁾から表を転載し解説する。

車載のセンサーを理解するため必要な、自動運転のレベルを表4に示す。米国の自動車関係の非営利団体 SAE International (Society of Engineers, Inc.)が発行しているガイド“Surface vehicle recommended practice” (J2016, Sep. 2016)の内容を簡略化した表であるが、このレベル1からレベル5のレベル分けは国際的に広く採用されている。日本でも公益社団法人自動車技術会から JASO テクニカルペーパー“JASO TP 18004:2018 自動車用運転自動化システムのレベル分類及び定義”が発行されていて、詳細を知ることができる。

この自動化運転のレベルに対応し、車載のセンサーモジュールとしては、どんな種類が何個必要かを予測した結果が発表されている(表5)。この内容を見ると、注目の話題と大きく違っていることに驚かされる。話題が集中している LiDAR は自動運転のレベル3以降で、1台だけ搭載される(この数値は参考であるが)のに対し、超音波センサーはレベル3からは10台搭載、近距離用レーダー、近距離用カメラ、長距離用カメラは、複数台が見込まれている。レベル3以上の自動運転車は、複数の感覚情報

を統合して行動する人や動物に近い姿が考えられる。そして個別のセンサーモジュールは、単独の性能というよりも自動運転車全体の制御系の中で協調動作を行う一環としての評価が行われることとなると予想される。

6. 注目すべき測距装置の話題

車載測距装置全体について、バランスのとれた解説を行うことは大変困難であるので、情報収集中に会った注目したい話題を取り上げる。

●構造化パターン映写による測距

投射型モアレ計測として、3D物体に斜めから明暗の格子を映写、3角測量の原理で形状計測を行うことは1970年代以来行われてきているが、自動車だけではなくスマートフォンにまで構造化した光のパターンを映写する技術が取り入れられるようになってきている。車載では、前方の路面の凹凸を高精度で計測しサスペンション制御に反映させる装置が販売され⁹⁾、ドライバーの顔の3D形状をモニターすることで交通事故防止につなげる研究も行われている¹⁰⁾。高価で大型とされている LiDAR 実用化の力ともなると思われるのは、スマートフォンのユーザーログインに用いられているパターン映写と3D計測技術である。古くは大型の健診装置に始まり、手持ちの人体形状計測から一足飛びに、スマートフォン画面の上部切り欠きの中の配置にまでに急進歩した(図12)¹¹⁾。

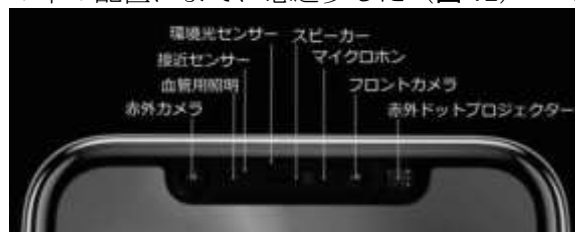


図12 スマートフォン上部の切り欠き

●単眼のカメラはLiDARを超える!?

単一のカメラに優れた画像処理能力を加えることで、ステレオカメラやLiDARを超えるという報道が次々に登場している。イスラエルモバイルアイ社や日本のレバトロン社など、登場人物にも注目が集まる報道がされている。

この他、単一の光源とMEMSを用いるLiDARなど、独自性を持ったセンサーユニットについて、優位性を主張する発表が相次いでいる。オンラインニュース、ツイッターのリンク先を参照いただきたい。

7. まとめとして

人の奥行き感覚を解説し、画像機器の技術史

研究者の視点に立ち、車載測距装置についての紹介を行った。これまでの画像機器の歴史に倣い、いろいろな方式が一部は交代しながら併存して進んでいくと思われる。

参考文献

- 1) 田中芳郎，動く絵の玩具からシネマまで（前・後編），ミラーイメージ（ペンタックスギャラリーニュース），No.37, No.38 (1977).
- 2) 動く絵のおもちゃとレーザースキャナー，連載ホビーハウス，O plus E, pp.104 (1981年11月).
- 3) 鏡惟史，連載ホビーハウス，初期のテレビジョン研究の走査光学系から，O plus E, Vol. 39 No.6, (2017年6月)
- 4) 長田昌次郎，画像情報と奥行き感，O plus E, No.23, pp. 57 (1981年10月)
- 5) 渡部叡，坂田春夫，長谷川敬，吉田辰夫，畑田豊彦，「視覚の科学」，写真工業出版社 (1975).
- 6) 応用物理学会光学懇話会：編，「生理光学—

眼の光学と視覚—」，朝倉書店 (1975).

- 7) 鷲尾邦彦，車載 LiDAR の最新の動向，月刊オプトロニクス，オプトロニクス社 (2017年2月) Web 上でも全文が公開されている。

<http://sensait.jp/281/>

- 8) JASO TP 18004:2018 「自動車用運転自動化システムのレベル分類及び定義」，2018年2月1日制定.

- 9) 草村航，自動運転を支えるセンサ技術“LiDAR”と路面計測，東陽テクニカ コラム自動運転 (2018年6月6日)

<https://www.toyo.co.jp/solution/car/column/detail/id=13951>

- 10) 山本和夫，木下航一（オムロン），ドライバー起因交通事故削減に向けたドライバーモニタリングセンサー，月刊オプトロニクス，pp. 78 (2018年5月).

- 11) 桑山哲郎，iPhoneX に搭載されている 3D 形状測定による顔認識，3D 映像，Vol. 31, No.3 pp. 44 (2017年12月).

表4 自動運転のレベルの概要^{7, 8)}

自動運転の監視	自動運転レベル	名称	定義の概要
ドライバー	0	手動運転	注意喚起のサポートはあるが，ドライバーがすべて運転操作
ドライバー	1	運転支援	加速・操舵・制御のいずれかをシステムが行う状態
ドライバー	2	部分的自動運転	加速・操舵・制御のうち複数をシステムが行う状態
システム	3	条件付き自動運転	すべての運転操作をシステムが行うが，システムが介入を要請したときはユーザーの適切な対応が必要な状態
システム	4	高度な自動運転	システムがユーザーに介入を要請したときに，ユーザーが適切に対応できなくても，システムが対応してすべての運転操作を行う状態
システム	5	完全自動運転	システムがすべての運転操作を行う状態

表5 自動運転レベルに必要と推定されるセンサーモジュールの種類並びに個数⁷⁾

センサーの種類	レベル1	レベル2	レベル3	レベル4	レベル5
超音波	4	8	10	10	10
長距離用レーダー	1	1	2	2	2
近距離用レーダー	1	4	6	6	6
長距離用カメラ			2	2	4
周辺用カメラ		4	5	5	5
立体カメラ			1	1	2
マイクロボロメーター			1	1	1
LiDAR			1	1	1
自律航法センサー			1	1	1
合計	6	17	29	29	32