

ビジュアルシミュレーションによる運転者の視線解析手法について

A New Method for Analyzing Driver's Scanning Pattern in Driving
used by the Visual Simulation System

萩原 亨*, 加来 照俊**

By Toru HAGIWARA and Terutoshi KAKU

This paper describes a new visual simulation system displayed driver's visual scanning pattern in driving. The relationship between driver's visual objects and driver's visual scanning pattern becomes clearly by using this system. It has been designed to make the video image superimposed the driver's eye-movement pattern and driver's visual field image photographed from the inside of a test vehicle. This system can coincide the view point coordinate system of visual field image with the view point coordinate system displayed driver's eye-movement pattern. Driver's eye-movement pattern can be displayed from every direction by reconstructing 3-dimensional structure of driver's eye-movement pattern and visual field.

1. はじめに

本研究の目的は、ビジュアルシミュレーションシステムを応用し、運転者の視点を表示する画像とカメラ映像を合成することにより、視点とカメラ映像内の視覚対象物との関係をより明確にできる運転者の視点解析システムを開発することである。

従来の視点解析システムでは視点の表示画像は頭部カメラの映像との合成しかできないため、運転者とカメラの視点座標系が異なる場合、視点と映像の関係が合致しなかった。

また、著者らは、運転者の視点を三次元的に求めるシステムを開発し、運転者の視覚的挙動を評価する研究を行っている。しかし、このシステムは、運転者の視点表示画像とビデオカメラ映像を合成する

* 正員 工修 北海道大学助手 工学部土木工学科

**正員 工博 北海道大学教授 工学部土木工学科

(〒060 札幌市北区北13条西8丁目)

システムを持たないため、視点が表示する視覚対象物の判断が困難であった。

ビジュアルシミュレーションシステムの応用による視点解析手法の長所を以下にまとめる。

a) 車両に固定したビデオカメラの映像と頭部運動を考慮した運転者の視点表示画像の合成が可能となる。この結果、運転者の視点を表示する視点座標系とビデオカメラの視点座標系が一致するため、視点と映像内の視覚対象物の関係が明確になる。

b) 運転者の三次元視点位置の計算と視覚対象物の位置データの入力により、視覚対象物の判断が座標値の計算から可能となる。また、視点座標系の一致した合成画像を見ることにより、この結果の検証が可能になる。

c) 撮影されたカメラ映像に架空の標識等を入れたシミュレーション映像を、作ることができるようになる。室内の大型TVに写したシミュレーション映像を被験者に表示し、視点の測定や聞き取り

調査を行うことにより、標識等の見やすさの評価がシミュレーション映像により可能となる。

2. 従来の運転者の視点解析手法について

アイマークレコーダに代表される眼球運動測定装置は、被験者の視点をリアルタイムに二次元的に表示し、被験者の頭部に取り付けたカメラの映像と注視点を合成表示する装置である。これらの装置により視点の動きと画像内の視覚対象物の関係が判定可能となった。

過去において、このような解析手法による運転者の視点解析に関する多くの研究^{1), 2), 3), 4)}が内外においてなされてきた。各コマの映像と視点の重なりを解析者が処理しなければならず、多大な労力を必要とした。

ビジョンアナライザに代表されるように、視点の座標値の出力に関してはリアルタイムにデジタル処理できる装置が最近の科学技術の進歩により開発され、多くの分野で活躍するようになってきた。しかし、これらの装置から出力される視点の座標値はあくまでも平面上の値であり、運転者が見た視野映像との関係は測定のとときに得た合成画像を用いるしかない。

また、著者らは、ビジョンアナライザによる眼球運動の測定と画像解析による頭部運動の測定を行うことにより運転者の視点位置を三次元的に求めるシステムについて研究^{12), 13)}を行ってきた。運転者の視点位置を三次元空間内において求めることができるようになり、定量的な視点解析が可能となった。しかし、視点位置の計算は計算機内での処理であり、その視点位置を表示する画像とカメラ映像の合成ができなかったため、視点と視覚対象物の関係を簡単に処理できない問題点があった。

このように、眼球運動による運転者の視点位置は計算機処理可能となったが、最も重要である視点と視野映像の関係を明確に処理する問題については、課題が残されている。

3. 三次元空間の基礎的な概念について

運転者の視野空間、車載カメラにより撮影される空間は三次元である。一方、VTRに記録される映像、コンピュータのCRTに表示される視点位置の

画像は二次元である。三次元的な位置関係をシミュレーションするため、三次元空間を二次元平面に投影する過程と、その逆に二次元の座標値に奥行き等のデータを加えて三次元化する過程が必要である。座標系の設定及び座標変換において、三次元グラフィックの基礎的な考え方^{5), 6), 7), 8)}を応用した。

以下で述べる三次元グラフィックに関する種々の概念は、ANSIにより定められたPHIGS (Programmer's Hierarchical Interactive Graphics Standard)^{9), 10), 11)}の基本的な考え方に基づいたものである。

(1) 三次元グラフィックスの性質について

三次元空間を対象とする処理の性質について考える。三次元空間を特徴づけている第三の次元、すなわち奥行きの存在によって、単なる座標値の個数の増加を越えた、原理的に複雑な問題を取り扱う必要が生じてくる。

二次元図形の場合は、定義平面と“視方向”とは独立であり、図形の定義は“視る”という操作とは無関係である。ところが三次元空間では、対象を定義するのと同じ空間の中で“視る”操作が行われるため、両者の間に相互作用が生じる結果、以下のような処理が必要になる。

a) 三次元の対象を二次元平面へ射影する。

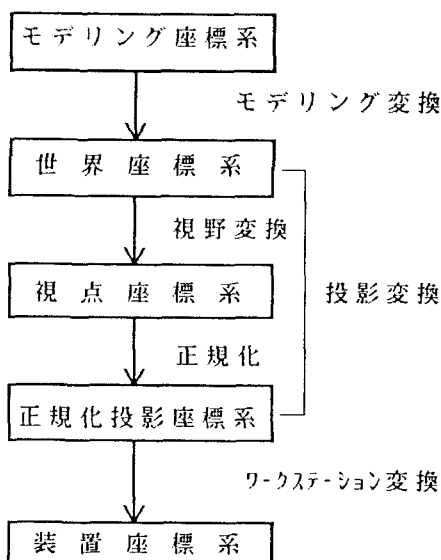


図-1 三次元座標と座標変換について

b) 射影によって失われる奥行き情報を、適当な表示手段によって回復する。

これらの処理が可能であるためには、もとの三次元対象の定義そのものに、必要な情報がすべて含まれている必要がある。

また、三次元空間における処理が、対象の定義・操作と、その二次元図形としての表示という二つの部分に分けられることがわかる。前者は幾何モデリングと呼ばれ、後者の表示処理を意味するグラフィックとは切り離して考えられる。

(2) 三次元空間における座標系

三次元空間を対象とする処理の各過程において、種々の座標系を考える必要がある。ここでは、以下に示す5種類の座標系を用いた。なお、座標系はすべて右手系として扱った。三次元の各座標系と座標変換の関係を図-1に示す。

a) モデリング座標系 物体の形を定義している座標系

b) 世界座標系 物体がおいてある空間の座標系

c) 視点座標系 世界座標系内の物体を眺める座標系

d) 正規化投影座標系 投影変換された三次元物体が二次元的に表示される座標系であり、その大きさが正規化された座標系

e) 装置座標系 出力装置の画面の座標系

(3) 座標系の変換

モデリング座標系により定義された三次元物体を世界座標系に設置し、視点座標系から見た形状を画面に出力するまでの座標変換について以下にまとめる。図-1に座標系と座標変換の関係を示す。

このような変換を行うことにより、二次元の画像を見ても立体的にしかも、実際のカメラで撮影したものと同等な状態で表示することができるようになる。ここでは、普通のカメラで物体を撮影した時の変換に相当する基本的な投影変換だけを考えたシステムを用いた。

a) モデリング変換 モデリング変換は、世界座標系の中に物体を配置する変換である。三次元のモデリング変換は、物体の平行移動、スケーリング(拡大、縮小)、および回転について行う。

b) 投影変換 投影変換は、世界座標系内の定まった位置にある物体を、ある場所から眺めた場合に、二次元的に表示するための変換である。

投影には、平行投影と透視投影があるが、ここでは透視投影を行った。投影中心は眼の位置またはカメラの位置に相当し、視野参照点はカメラレンズの画角の決定に相当する。

また、視野面上に投影された図形は、正規化された投影座標系に変換される。世界座標系に設定された視点座標系のモデルを図-2に示す。

c) ワークステーション変換 ワークステーション変換は、正規化投影座標系内の三次元ワークステーションウインドウの内部をパーソナルコンピュータの装置座標系内の二次元ワークステーションビューポートの内部に移す変換である。

4. ビジュアルシミュレーションによる視点解析システム

コンピュータで画像を作成し、シミュレーションに応用するシステムが一般のビジュアルシミュレーションシステムである。しかし、画像処理専用のコンピュータを用いても現実感のない映像しか作成することは困難であり、加えて入力データが膨大になる問題は避けられない。

そこで、撮影されたビデオ映像の一部にコンピュータによる画像を挿入し、シミュレーション映像を

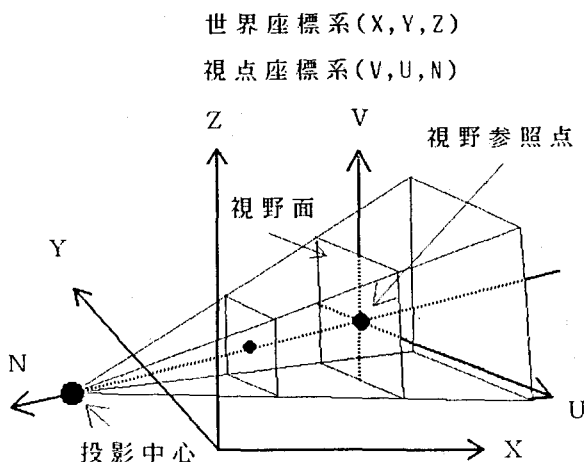


図-2 視点座標系と投影変換

作成する簡易なビジュアルシミュレーションシステムが考えられている。

ビジョンアナライザによる眼球運動の測定と画像解析による頭部運動の測定を行うことにより運転者の視点位置を三次元的に求めること¹²⁾が可能である。この三次元視点解析システムに、以下に示す二つのシステムを加えて、運転者の視点表示画像とビデオ映像を合成する視点解析システムを作成した。図-3にシステムのフローチャートを示す。

a) 運転者の三次元視点位置の座標値と道路空間の座標値を入力し、その画像をワイヤフレームモデルによる二次元の動画像(アニメーション)に変換してリアルタイムに表示する。

b) 三次元視点位置を表示する動画像と車載カメラにより録画されたVTR画像の合成を時間的な同期を計りながら行う。

すなわち、二次元座標値として得られた視点データを三次元化した結果の表示と視野映像のビデオ映像を同一の視点座標系から”視る”ことにより再び二次元表示した。

(1) 運転者の視点の三次元化について

運転者の眼球運動と頭部運動を測定し、二次元的視点位置を三次元空間に表示した。三次元的視点は、眼球運動測定装置から出力される視点の方向に頭部運動の方向を加えて拡大し、設定した道路空間(図-6)と交差する点から求めた。

眼球運動は、ビジョンアナライザにより測定した。頭部運動は、運転者の頭部に固定されたカメラの映像に記録された車両先端の指標位置の座標値を読み取ることから求めた。また、これらの測定以外に車両の走行地点を明らかにするため、パルスカウンタによる速度センサからの出力データを記録した。

a) ビジョンアナライザによる視点の測定

ビジョンアナライザは、NHKの技術研究所で開発された強力なデータ処理機能を持つ眼球運動測定装置である。著者らは、NHKと共同で運転者の視点の測定に応用するシステムの開発を行った¹³⁾。図-4にビジョンアナライザによる測定システムの構成を示す。運転者の視点位置をリアルタイムにデジタル値として記録し、同時に視点の軌跡を頭部カメラ

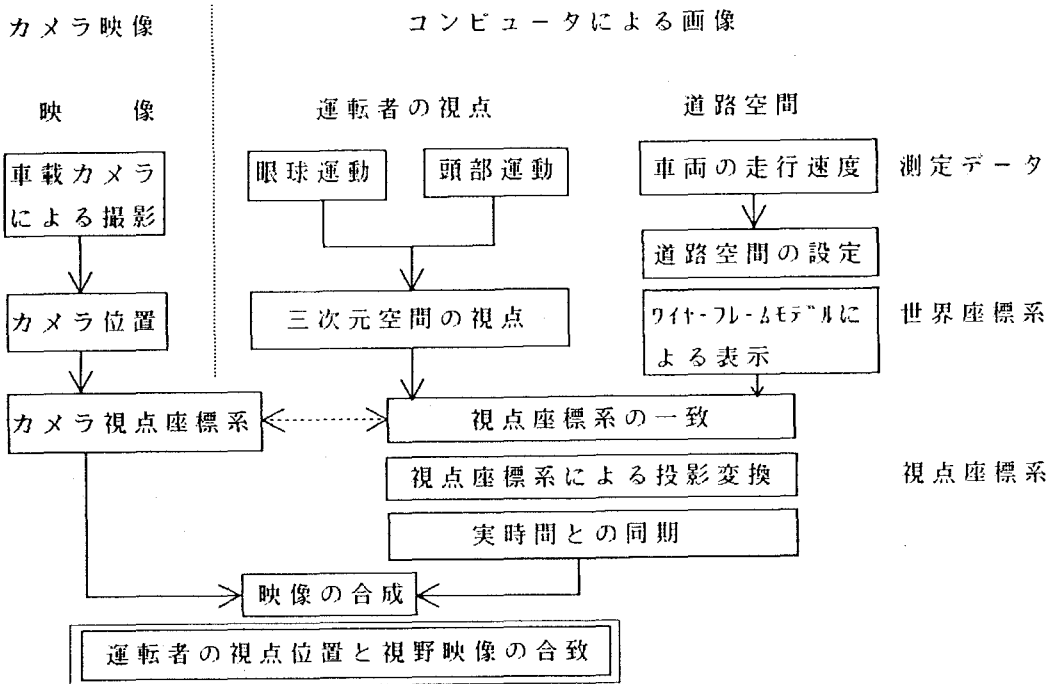


図-3 ビジュアルシミュレーションによる運転者の視点解析手順について

の映像と合成する装置である¹⁴⁾。

ビジョンアナライザの特徴をまとめる。眼球運動をリアルタイムで計算機処理し、視点の軌跡の形で被験者が観察している画像と重ね合わせうる。また、測定結果は計算機のメモリに記録され、長時間にわたる大量のデータを扱うことが可能である(10Hzのサンプリングで、約1時間)。さらに、注視点分布・速度分布・運動ベクトル分布などの計算処理と出力が即時に行える。

また、運転者に装着される眼球運動検出部は、眼鏡用のフレームの下部に検出用素子を取り付けたものであり、運転者の視野への影響は少ない。このため、測定条件を拘束する条件がこれまでの眼球運動測定装置に比べて少ない。

ビジョンアナライザによる視点の測定は、実験前に被験者の視線と測定装置の視線の位置を示すマークを一致させる較正が必要となる。図-5に示すようなパターンを被験者に見せ、中央、上下、左右の5点が一致するように較正を行う。なお、パターンは運転者の眼の高さと中心が一致する前方に固定して表示した。

較正の際には、ゼロ点補正ならびに強膜反射法で生じる水平および垂直移動成分間のクロストークの除去を、赤外光源の位置の機械的調整と電気的な補正を組み合わせで行う。被験者1人あたり5-10分の較正時間を必要とする。

b) 運転者の頭部運動の測定

運転者の頭部は、走行時において主にY軸回りの回転(ピッチ)とZ軸回りの回転(ヨー)を行う。頭部運動の測定は、杉江¹⁵⁾、大坪¹⁶⁾、山田¹⁷⁾等によりなされており、幾通りかの測定手法が考案されている。ここでは、頭部に取り付けた小型カメラの映像と車両に取り付けた指標の相対運動から測定した。

試験車の前方に固定した指標を2点設定し、その指標の動きを運転者の頭部に装着した小型カメラにより撮影する。映像を再生し、初期設定状態と必要な区間の指標の座標値を映像から0.2秒間隔でサンプリングし、指標の座標値のY軸方向、及びZ軸方向の移動量を求めた。

なお、頭部運動の初期値は、運転者に正面を向いてもらい、そのときカメラに撮影された指標の位置

を初期値とした。同時に、初期設定時の運転者の眼の位置とカメラの位置を簡易に測定した。

(2) 三次元視点位置を表示する動画像の作成

世界座標系内に視点座標系を定義することにより運転者の三次元視点位置と道路空間を二次元画像に変換した。また、図-8に示すような二次元的に表示された視点位置と道路空間の画像を1画面当り1/30秒の速度で画面に表示した。

a) 運転者の三次元視点位置の二次元表示

三次元視点位置と道路空間のモデルを幾何学的に世界座標系に配置する(図-6)。

世界座標系の原点は車両の重心の鉛直下方向と路面が交わる点とした。車両の走行により世界座標系の原点は動くことになるが、車両に固定されているカメラの視点座標系が動かない利点が生まれる。

運転者の三次元視点位置を"視る"視点座標系の投影中心はカメラ映像との合成を考えるため、車両に固定されたカメラの位置と一致させた。図-6にカメラの位置と投影変換を行う視点座標系を示す。

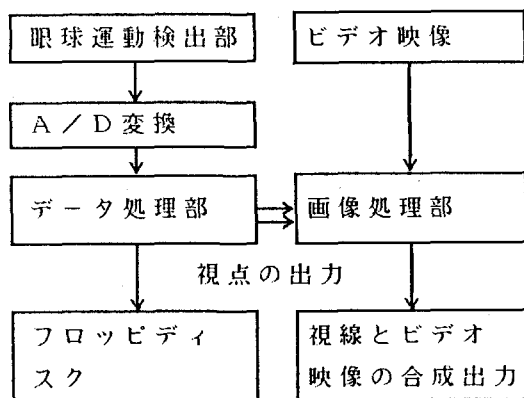


図-4 ビジョンアナライザのシステムについて

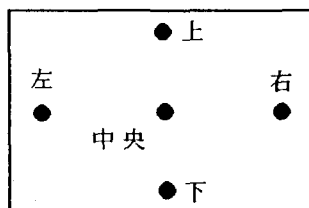


図-5 ビジョンアナライザの較正画面

図-7は測定された運転者の視点の位置と道路空間を世界座標系に示した図である。

視点座標系は、投影中心と視野参照点の決定により世界座標系内に定まるが、これらは車両の振動により変化する。

このため、世界座標系に表示されている運転者の視点を二次元画像に変換するには、視点座標系の投影中心の座標値の時間変動を考慮する必要があるが、通常の走行において車両の振動は周期的に短いと考え、投影中心は固定とした。

b) 二次元表示による動画の作成

運転者の三次元視点位置とその軌跡及び道路空間を1/30sec毎に表示するシステムを開発し、動画の作成を行った。画像の表示速度を速くするために、C言語により画像の表示システムを開発した。

運転者の三次元視点の表示と同時に、図-6に示す道路空間をワイヤフレームモデルで表示した。道路のセンターライン、上下左右の境界線、及び車両のボンネットと指標である。図-7の視点位置と道路空間をカメラ位置における視点座標系により表示したのが、図-8である。

車両に固定されたカメラの映像と合成する場合、視野参照点と投影中心の関係は固定される。すなわち、視点座標系の世界座標系における位置が固定されることになる。このときは、道路空間やボンネットなどの表示は、車両の走行により二次元画面内で動かない。

(3) コンピュータによる動画とビデオ映像の合成

合成画像を作る場合、コンピュータにより計算された運転者の視点を表示する視点座標系とカメラ映像による視点座標系の一致を行うため、両者の無限遠点が一致する必要がある。また、映像間の時間的な同期を行う必要がある。

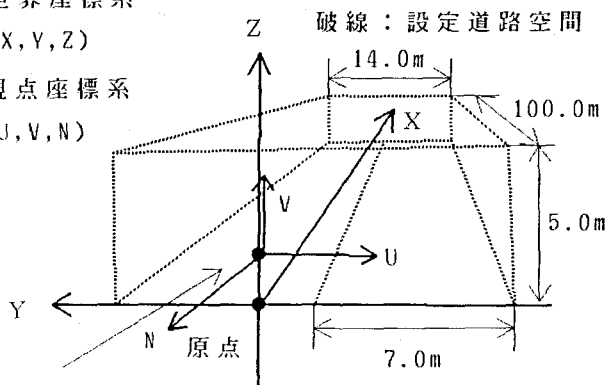
a) ビデオカメラの視点座標系と運転者視点を表示する視点座標系の一致について
車両に固定されたカメラの視点座標系に

世界座標系

(X, Y, Z)

視点座標系

(U, V, N)



投影中心

(X=0.0m, Y=0.0m, Z=1.2m)

図-6 世界座標系に示す道路空間と座標系の位置

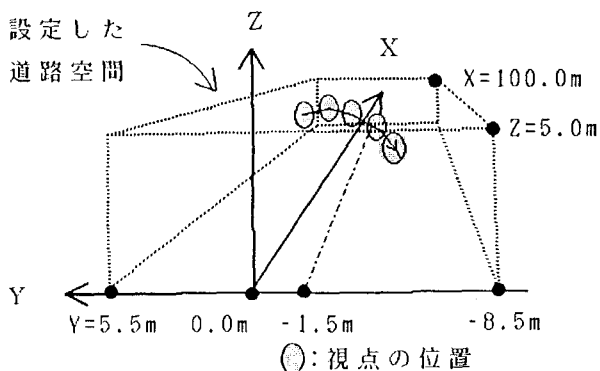


図-7 世界座標系による視点と道路空間の表示

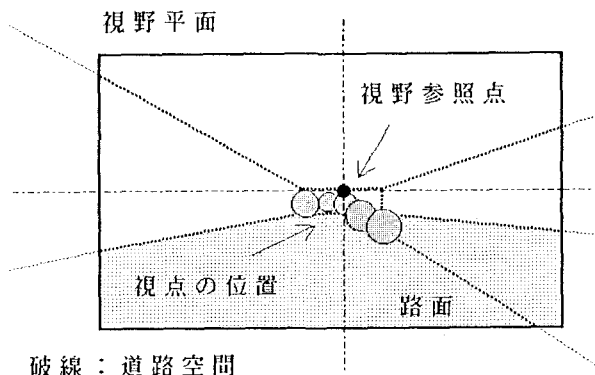


図-8 視点座標系による視点と道路空間の表示

おける投影中心と視野参照点を結ぶN軸（図-6参照）が、世界座標系のX軸（図-6参照）に平行であれば、両者の無限遠点の一致は簡単である。しかし、カメラの方向をいつも世界座標系のX軸方向と平行に設置することは、不可能である。

そこで、コンピュータにより出力される動画像の視点座標系を変えることにより、視点座標系を合致させた。無限遠点の一致は、動画像により示された道路空間の道路上のラインとカメラから得られた映像の道路のラインが交わらないことから判断した。図-9に例を示す。路面の白線（実線）とコンピュータの画像の二次元表示によるライン（破線）が無限遠点ではば一致していることがわかる。

カメラから撮影された映像は、完全な二次元平面ではない。なぜなら、撮影に使われるレンズが曲率をもっており、そのために発生するひずみがあるためである。しかし、ここでは、これらのひずみによる影響は微小であるとした。

b) 時間的同期について

一般に動画像を作成する場合、1/30secより短い時間毎に一枚の静止画像を表示することにより画像が動いているように見せる。従って、一枚の二次元画像を表示するのに、1/30sec以下である必要がある。

ここでは、画像が簡単なワイヤーフレームモデルと視点の軌跡の集合であるため、リアルタイム以上の速度で運転者の視点位置と道路空間を表示できるシステムを開発した。この結果、コンピュータの計算速度を適当に遅くしてリアルタイムに流れるビデオ映像との合成が可能となった。

5. ビジュアルシミュレーションシステムによる視点解析結果について

従来の視点解析システムではビデオ映像に示された視点の解釈が困難であったケースにおいて、ビジュアルシミュレーションシステムの開発により理解が可能となった

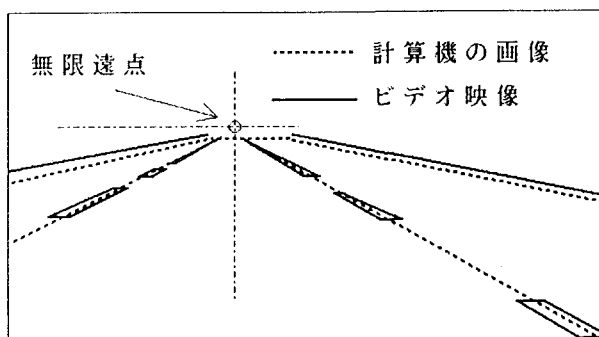


図-9 コンピュータの画像とカメラ映像の合成

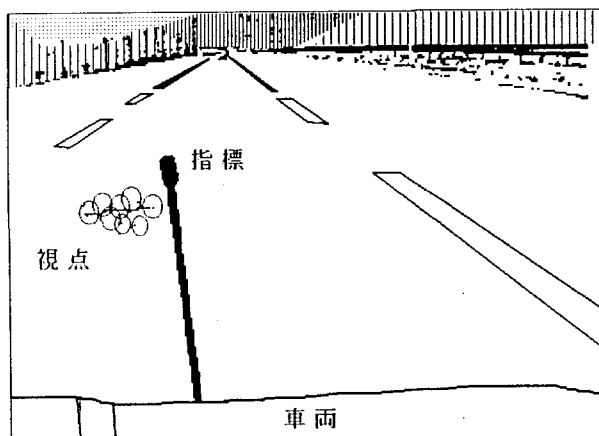


図-10 視点測定時の視点と映像の合成画像

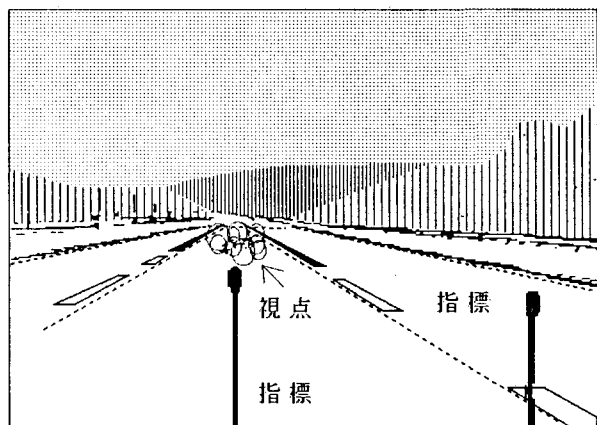


図-11 ビジュアルシミュレーションシステムによる視点と視野映像の合成画像

結果を示す。

頭部カメラの視点座標系は、投影中心が被験者の額の位置にあり、被験者の眼の投影中心と高さが異なる。一方、視野参照点は、カメラの角度の設定と運転者の頭部運動により動く。よって、頭部カメラの映像と運転者の視点を示す画像の合成において両者の視点座標系は異なると考えられる。その合成映像から視点と視野映像の関係を判断することは、困難であろう。

図-10は、約60km/hで直線路を走行している運転者の視点測定結果である。頭部のカメラで撮影した映像は、車両のボンネットの先端が見えている。一方、運転者の視点は、中心より左の中央付近に集中している。よって、運転者は車両の左方向の直前付近の路面を見ていると思われるが、実際には運転者の視点とカメラの視点座標系の違いがあり、その両者の視点座標系を考慮して映像を合成する必要がある。

そこで、ビジュアルシミュレーションシステムを用いて視点の再合成を行った結果を図-11に示す。運転者の眼球運動の測定値と頭部運動の測定値から視点位置を三次元的に求め、その視点を二次元的に表示し、車両に固定されたビデオカメラの映像と合成した結果である。図-11から明らかなように、運転者の道路前方の中央付近の路面を見ていることが読み取れる。

このように、運転者の視点を三次元的に求めた視点位置を表示する画像の視点座標系と車載カメラの視点座標系を一致させて合成表示することにより、運転者の視点と視野映像の関係の解析が容易になることが分かる。

6. まとめ

コンピュータにおいて構成された三次元空間を表示する二次元動画像と実際の映像を合成することにより、運転者の視点に関して具体的な数値（空間的座標値）と現象をより簡単に把握することが可能となった。

さらに、運転者の視覚挙動の解析のみならず、三次元空間にコンピュータにより架空の標識等を作成し、ビデオ映像と合成することにより、その標識の評価を行う新たなビジュアルシミュレーションは今後更に多方面において使われるものと思われる。

なお、本研究は佐川交通社会財団交通安全調査研究振興助成（昭和63年度課題研究）の交付により行ったものである。

参考文献

- 1) Mourant, R.R and Rockwell, T.H.: Driver's Eye Movement and Visual Workload., Highway Research Record, No. 292, 1969
- 2) Shinar, D., et al.: Eye Movements in Curve Negotiations., HUMAN FACTORS, Vol. 19, 1977
- 3) 村田隆裕, 注視行動の統計的性質, 土木学会論文報告集, Vol. 213, 1973
- 4) Nagayama, et al.: Motorcyclists's Visual Scanning Pattern in Comparison with Automobile Drivers., SAE Paper 79052, 1979
- 5) 川合, 基礎グラフィックス, 昭晃堂, 1985
- 6) 山口富士夫, コンピュータディスプレイによる図形処理工学, 日刊工業新聞社, 1981
- 7) 守川稔, PC9801 3次元グラフィックス入門, アスキー出版局, 1986
- 8) 安居院、他, C言語による3次元コンピュータグラフィックス, 昭晃堂, 1987
- 9) 木村文彦, 3次元グラフィックとマン・マシン・インタラクション, 情報処理学会, グラフィックスとCAD研究会資料16-6, 1985
- 10) 木村文彦, ISOにおけるグラフィックス標準化活動の現状, 情報処理学会, グラフィックスとCAD研究会資料16-6, 1984
- 11) PHIGS, ANSI X3H3/84-40, 1984
- 12) 萩原、加来, 運転者の注視点とその評価に関する研究, 土木計画学研究論文集, Vol. 6, 1988
- 13) 加来、他, ビジョンアナライザによる運転者の視線追跡, テレビジョン学会報告, Vol. 9, 1985
- 14) 山田、福田, 視線情報を用いた画像の客観分析, NHK技研R&D, No. 2, 1988
- 15) 杉江, 眼球運動系のシステム解析, 電気試験所研究報告, No. 63, 1968
- 16) 大坪、他, 運転中の車速、旋回および頭部回転、眼球回転の同時測定, 交科協資料, Vol. 24, 1983
- 17) 山田、福田, 広視野の画面効果－視対象の移動量と視線、頭部の動き特性, テレビジョン学会, 1988