

# ARにおける注釈表示のための ウェアラブル・スキャニング・レーザー・プロジェクター

安藤 英由樹\*<sup>1</sup> 雨宮 智浩\*<sup>1</sup> 前田 太郎\*<sup>1</sup>

A Wearable Scanning Laser Projector for Augmenting Annotation Information

Hideyuki Ando\*<sup>1</sup> Tomohiro Amemiya\*<sup>1</sup> and Taro Maeda\*<sup>1</sup>

**Abstract - The Wearable Scanning Laser Projector (WSLP) is a novel head-mounted display for augmented reality (AR). WSLP specializes the movement of a narrow display area to a wide real environmental area. AR systems commonly uses optical see-through head-mounted displays (HMD). With such HMDs, because the images are projected at a specific focal length, it is difficult to observe both the object and the corresponding images at the same time when they exist at different depths. In the WSLP, the center of the mirrors scanning the laser beam can be aligned conjugate to the center of the wearer's eye. As a result, the light spot of the beam is always observed at any depth. With the WSLP, information can be shared with nearby friends and colleagues who are not wearing similar devices.**

**Key Words: Augmented Reality, Wearable Scanning Laser Projector, focus depth, Time Delay Compensation**

## 1. はじめに

Augmented Reality (AR)は実環境の物体に対してバーチャルな情報を様々な重畳する技術である[1]。そして、視覚的 AR 技術の現実的な応用として遠隔作業支援やナビゲーション手法がこれまで提案されている[2][3]。本論文では、このような遠隔作業支援のための新たな AR 情報提示システムを提案する。

遠隔作業支援とは、機械のメンテナンス等複雑な作業をする際、その作業に不慣れな人に対して、遠隔地から熟練者の指示を与えることによって、その作業の支援を行うものである。具体的には、視覚情報を付加する AR 技術を用いて、作業手順や作業対象の情報を提示することによって、迅速且つ確実に作業を行えるようにする。

このような用途を目的とする AR システムは、主に Head-Mounted Display (HMD)等の作業者に視覚情報を提示する情報提示ディスプレイ、作業領域の情報を撮影する小型カメラ、ネットワークに接続されたウェアラブル・コンピュータによって構成されている。作業者は小型カメラを通じて熟練者に現場の状況を伝え、熟練者は情報提示部ディスプレイで作業対象の指示や注釈情報などの適切な支援情報を作業者に提示する。本論文では、特に簡便かつ十分な情報を提示可能なレーザー・スキャニング方式のウェアラブル情報提示ディスプレイ (図 1) について論じる。

## 1.1 遠隔作業支援の AR 視覚情報提示ディスプレイ

遠隔情報支援のための視覚情報提示ディスプレイを実現する上で、作業対象と提示情報の焦点が一致しないと、高い頻度で焦点調節眼球運動を行うことになり、作業性を損なうだけでなく、視覚疲労の原因となる[4]。また、当然ながら、熟練者からの指示は注意視野[5]の全領域に提示可能であることが望ましい。そして、作業者のウェアラブルディスプレイによって提示された情報の位置が、作業者の移動によって変化しないことも作業支援においては重要である[6]。これらの要求を満たすためには以下の3点が設計指針として求められる。

- (1)常に作業対象と提示情報の焦点が一致
  - (2)注意視野全領域かつ高解像度の提示
  - (3)作業対象と提示情報の安定した位置の一致
- しかし、既存のディスプレイにおいてはこれらを同時に満たすことは困難であった。

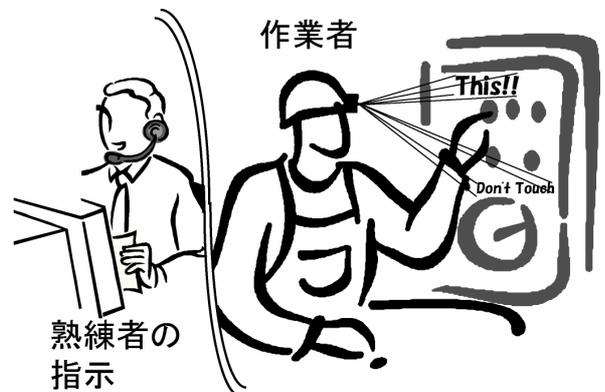


図 1 提案手法の使用イメージ

Fig. 1. Image of proposal method

\*1 NTT コミュニケーション科学基礎研究所  
\*1 NTT Communication Science Laboratories

## 1.2 これまでのAR 視覚情報提示ディスプレイ

これまでの遠隔作業支援用情報提示ディスプレイの多くは、HMD が利用されてきた。HMD の一般的な問題点として、作業者の視野内に重畳される視覚情報（バーチャル情報）の焦点が固定であるため、実環境の作業対象と焦点が一致しない（前述設計指針1が未解決）。そのため、作業においては、図2のようにバーチャル情報に焦点を合わせているときには、実環境の対象物がぼやけ、実環境に焦点を合わせているときにはバーチャル情報がぼやけてしまう。また、文献[4]ではHMD よりも実環境にレーザーポインターで指し示すWACL[7]を用いた方が視覚的疲労が少ないことを示している。この原因も焦点不一致によると推測可能である。

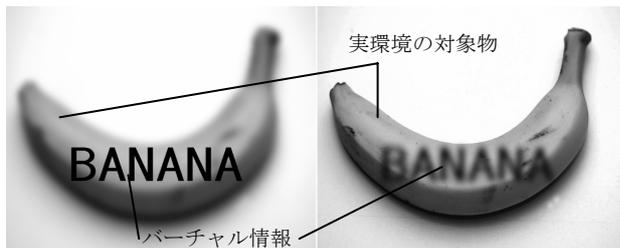


図2 従来のHMDにおける焦点の不一致の例

Fig. 2. Disagreement of focus

この問題を解決する手法として焦点調節補償機能を有するHMD[8]が開発されているが、高精度な計測・制御装置を小型のHMDの中に組み込むことは困難であり実時間的な光学系の機械的追従も難しい。また、Video See-through HMD[9]を用いることによって作業対象もバーチャル情報も同じ焦点距離に固定することが可能であるが、最終的な提示系のフレームレートによる遅延は補償できず[10]（前述設計指針3が未解決）、さらに、眼球の焦点調節手がかりによる奥行き知覚が失われるため作業性は低下してしまう[8]。

また、マクスウェル光学系と網膜投影を用いたディスプレイ[11][12][13]が提案されているが、これらのデバイスでは視野角が狭いという問題がある（前述設計指針2が未解決）。この問題に対して、広視野マクスウェル視を利用する手法[14]も提案されているが、眼球とHMDとの位置の関係がシビアなため高い固定精度を要求される。一般にマクスウェル光学系は視野角と固定精度にトレードオフがあり、両者を同時に実現することは本論文の目的とするウェアラブルデバイスとして現実的ではない。

一方で、実環境にバーチャル情報を直接投影する手法が提案されている。対象物或いは近傍の物体をスクリーンとすることが可能な条件下であれば、投影像は対象物と同じ焦点距離になるので前述問題点1が解決される。直接投影手法として、小型プロジェクタを肩に搭載し、手に持った白紙などに投影する

手法[15]が試みられているが焦点距離が固定されるため、様々な距離にある対象物に投影することは難しい。また、マクスウェル視と再帰性反射材（スクリーン）を利用したHead-Mounted Projector (HMP)も提案されている[16]が、前述したマクスウェル光学系の問題と実環境の対象物が再帰性反射材によってコーティングされていなければならないため環境を選ぶという問題があり本論文の用途には適切ではない。以上の考察から、投影距離にかかわらず対象物に投影するためにレーザーによる投影方式について検討する。

## 1.3 レーザースキャン方式の情報提示ディスプレイ

レーザーによる描画は距離の変化によって投影像がぼやけることがないため、対象物との距離にかかわらず投影像への焦点と対象物への焦点が一致する。そこで、本論文では遠隔作業支援等のAR視覚情報提示ディスプレイとしてレーザーによる実環境の対象物への投影手法について議論する。レーザーによる情報投影手法はモータによってミラーを駆動（ガルバノミラー）してX-Yにレーザー走査するシステムが広く用いられている。また、小型のレーザー走査プロジェクタ[17]も開発されている。しかしながら、レーザーによる直接投影において、[11][17]で採用されている共振駆動型ガルバノミラーで広視野角の実現を考えた場合、一定の輝度で投影するためには投影範囲（視野角）に比例して出力（光量）の高いレーザーを必要とするが、レーザーの出力が増すにつれ消費電力、大きさ、重量が増加するだけでなく使用者周辺の人に対して網膜損傷等の危険性が増加するため実用性に欠ける。

そこで、本論文では注釈情報などの表示領域を限定することによってこの問題を解決する手法を提案する。本論文で目的とする遠隔作業支援などのAR応用において、注釈などの提示は同時に多くの異なった情報を提示する必要はなく、注目すべき作業対

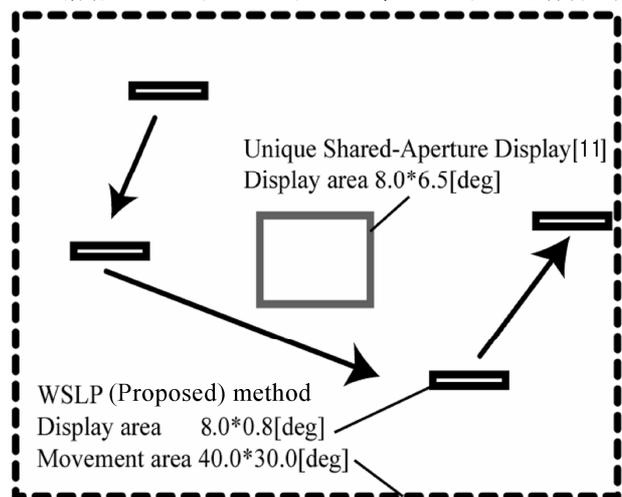


図3 表示領域の比較

Fig. 3. Unique Shared-Aperture Display vs. WSLP

象のいくつかにおいてのみ注釈情報を提示することが重要である[4]。そこで、図3のように狭い視野範囲の全域に情報を提示するのではなく、広視野範囲の中を移動可能な狭い表示領域によって情報を提示することを考える。

本論文では狭い表示領域を移動させる手法として非共振駆動型のガルバノミラーを採用した。非共振駆動型のガルバノミラーを利用することによって狭い表示領域を広く移動させる場合には、全域に情報を提示する場合に比べて、要求されるレーザーの出力は低くなる。このため、広視野角でありながら低出力のレーザーで視認に十分な輝度を得ることが可能である（前述設計指針2が解決）。

さらに、提案手法は狭領域提示走査と提示領域の移動が独立に制御可能なことから、提示領域のフレームレートにかかわらず頭部運動の速度より速い提示領域の移動が可能である（前述設計指針3が解決）と推測される。

以上を踏まえて、本論文では非共振駆動型のガルバノミラーを利用したレーザーによる直接投影手法を小型軽量化した Wearable Scanning Laser Projector (WSLP) を提案する。

以下、第2章では WSLP の設計指針について議論する。第3章では WSLP のメカニズムと特性について述べる。第4章では焦点の一致を確認する実験について述べ、第5章では頭部運動の追従特性について述べる。

## 2. WSLP の設計指針

WSLP の表示領域の範囲の決定と表示領域における解像度について議論する。

### 2.1 静的視野における可読領域

行動支援のための視覚 AR において、実空間での作業対象の空間的な位置と作業や対象に関わる文字や図形の注釈情報の提示は、作業対象と作業工程マニュアル等の文書との間で注意や注視の遷移を抑えることから、作業効率の向上に効果的である[18]。

しかしながら注釈情報としての文字の分量が増す場合には作業対象を覆い隠すことになるため、作業効率はかえって低下する[19]。

したがって本論文では注視点を移動させることなく注釈情報と対象物を同時に見ることができる視野領域において注釈情報を重畳することが作業支援に適切であると考えられる。

このような観点から、人間の視覚特性を考慮した表示領域について議論する。人間の視覚特性において文字の認識率は注視点から離れるほど低下する[20]。例えば、目から新聞などの通常の大きさの文字を目から 50[cm]離して見た場合の文字の幅を眼球回転角度に換算すると約 0.5[deg]であり、また見出しな

どの大きな字体では約 1.0[deg]である。文献[21]では注視点を移動させずに文字を認識できる範囲は約 10[deg]であると述べられている。従って水平方向に約 10~15 文字の文章であれば静的視野において読むことが可能であると考えられる。

以上から、表示領域を 10[deg]程度として（実際の WSLP では 8[deg]とした）、この領域を広視野範囲内で移動可能とするシステムを構築した。

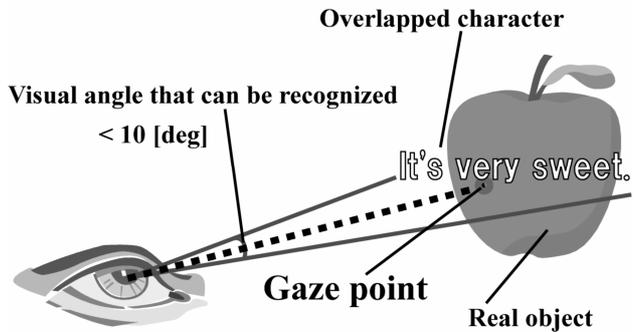


図4 注視点移動を伴わない可読領域  
Fig. 4. The range “at a glance”

### 2.2 表示領域の解像度

#### 2.2.1 ガルバノミラーの駆動周波数と解像度の関係

このシステムにおいて要求される水平駆動周波数、垂直駆動周波数、レーザー駆動周波数は以下の式で表される。

$$V_f = F_r \quad (1)$$

$$H_f = V_f \times \frac{1}{2} H_n \quad (2)$$

$$L_f = H_f \times H_r \quad (3)$$

ここで、 $F_r$  は表示のフレームレートであり、 $V_f$

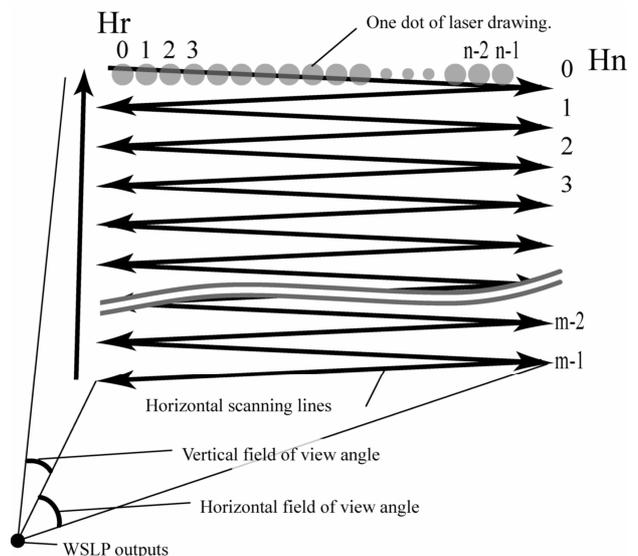


図5 走査の概要  
Fig. 5. Outline of scanning

は垂直方向のガルバノミラーの駆動周波数であり、 $Hn$  は水平走査線本数であり、 $Hf$  は水平方向のガルバノミラーの駆動周波数である。式(2)において通常のCRTなどの走査とは異なり左右往復両方において描画を行なうため走査線数は半分となる。 $Hr$  は水平方向のドット数である。そして $Lf$  はレーザーの駆動周波数である。(図5参照)

本論文における WSLP のフレームレート  $Fr$  は 40[fps] であり、垂直方向の分解能(走査線本数に相当)は 32[dot]、水平解像度は 256[dot] であることから、 $Vf$  は 40[Hz]、 $Hf$  は 640[Hz]、そして  $Lf$  は 163840[Hz] の駆動周波数を要求される。

### 2.2.2 解像度と視力の関係

ここでは人間の視覚特性から必要となる解像度について議論する。人間の視力は 2 点を 2 点として弁別できる能力と定義されている[22]。例えば、眼から 5.0[m] 遠方にある 1.5[mm] 離れた 2 点が弁別できれば視力 1.0 であり、これを視野角(視角)に換算すると 1.0[deg] (1/60[deg]) である。この視野角から解像度に変換する式を以下に示す。

$$\theta_r = \theta d / Hr \quad (4)$$

ここで、 $\theta d$  は水平方向のガルバノミラーの振幅角(光学角)であり、 $Hr$  は水平解像度である。また、 $\theta_r$  は角度に変換された解像度である。

本論文において提案する WSLP は  $\theta d$  が 8[deg] であり  $Hr$  は 256[dot] であることから、 $\theta_r$  は約 0.031[deg] である。これを人間の視力に換算すると視力 0.5 (2[deg]  $\cong$  0.032[deg]) 程度の解像度となる。

### 2.3 表示領域の輝度

提案する WSLP では光源として小型の赤色半導体レーザーを使用している(次章参照)。WSLP の表示輝度を確認するために、プロジェクター(コクヨ製 KM-P620X (2000 ANSI ルーメン))と輝度色調計(Tepcom 製 BM-7)を使用して比較を行なった。WSLP (8.0[deg]  $\times$  0.8[deg]) を用いて 1.6[m] 先のスクリーンに投影したときの輝度は 6.85[cd/cm<sup>2</sup>] であった。一方、WSLP の移動範囲と画角を一致 (40[deg]  $\times$  30[deg]) させ WSLP と同じ色調を表示させたときのプロジェクターの輝度は 8.57[cd/cm<sup>2</sup>] とほぼ同等であった。プロジェクタの最大輝度(白色)の場合にはレーザーと同じ色調(赤)の約 3 倍の輝度になるが、WSLP も R, G, B の 3 色のレーザーを使用することにより同様に約 3 倍の輝度にするには容易である。

同じ距離にあるスクリーンに走査型レーザーによって投影する場合、輝度は表示領域面積に比例して減衰する。これは、表示可能な領域の一部分のみしか注釈表示に使用していなかったとしても生じる。すなわち、表示可能領域において何も表示していな

い領域が増すほど高出力のレーザーを必要とする。

例えば、表示領域の面積が 2 倍になったときに同じ輝度を保つためには、2 倍のレーザー出力を必要とする。図 3 の WSLP と同等に[11]や[17]で使用されているような共振駆動型ガルバノミラーを用いて表示することを想定した場合、非常に高出力なレーザーをわずかな領域表示の間だけ駆動し、ほとんどの時間はオフすることになる。もし、共振駆動型のガルバノミラーを用いて同等の輝度を得るためには面積比から考えて WSLP の 300 倍のレーザー出力を必要とし、実現性に乏しい。

WSLP は 2000ANSI ルーメンのプロジェクターと同等の輝度を有していることから屋内での使用においては十分であると考えられるが、屋外での使用においては輝度が不足するためを高出力化するか、赤色波長選択フィルタ等で他波長の光量を減衰させることで視認性を向上させる必要がある。

また、WSLP は同時に複数の注釈を表示することが可能であるが、表示数に比例して輝度は減少する。しかし、このとき注釈情報の重要度に応じて表示を間引く(点滅させる)などの工夫をほどこすことで輝度を低下させることなく表示が可能であると考えられる。

## 3. WSLP のメカニズムと特徴

### 3.1 WSLP の全体構成

WSLP は 2 軸直交するガルバノミラー (SCM1015 千葉精密社製 応答周波数約 800[Hz]) と赤色半導体レーザーダイオード (HL6501MG 日立社製 波長 [650nm] 最大出力 [35mW]) によって構成される(図 6, 図 7)。実空間の対象物に対して赤色半導体レーザーからの出力を X-Y 平面(水平-垂直)に各軸走査する。本論文中ではラスタースキャンによる表示を想定しているが、図形などはベクタースキャンで描画することも可能である。この文字や図は水平 40[deg]、垂直 30[deg] の画角内の任意の位置に投影可能である。

WSLP のハードウェア構成を図 8 に示す。ラスタースキャンは PC 上の映像の任意の一部をキャプチャした情報と表示位置を USB1.1 によって FPGA の BRAM に転送する。FPGA は縦 32[dot] を 0.8[deg]、横 256[dot] を 8.0[deg]、フレームレート 40[Hz] で走査するようにガルバノミラーを制御し BRAM のデータに基づいてレーザーを駆動する。また、ジャイロセンサ等で頭部運動を計測し、バーチャル情報が頭部運動にかかわらず対象物上に固定されるように補正を行うことを想定している。

また、実空間へのレーザー出力位置は目と共役に配置されている(図 7)。このため、装着者から見た投影像の大きさは投影距離によらず常に一定である。

さらに、これらのデバイスの総重量は 85[g] (頭部

取り付け具除く)と軽量である。

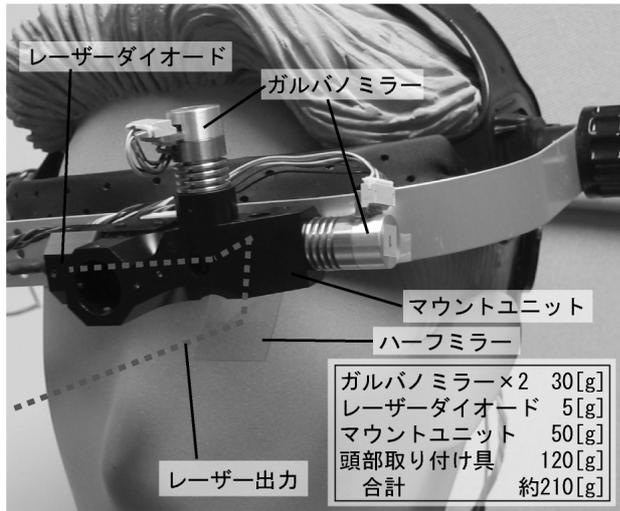


図6 WSLPの外観

Fig. 6. The overview of WSLP

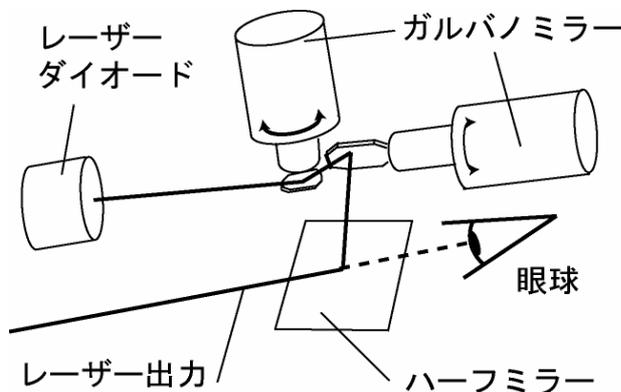


図7 WSLPの機構

Fig. 7. The mechanism of WSLP

### 3.2 WSLPの特徴

WSLPの特徴について以下に説明する。

(1) バーチャル環境と実環境の焦点が一致

WSLPによってバーチャルな情報を実環境の対象物或いは対象物近傍をスクリーンとして投影可能であるとき、バーチャル情報と対象物の位置は常に一致するため焦点が一致する。

(2) フレームレートに依存しない頭部追従

WSLPに使用しているガルバノミラーは走査による描画を行うのと同時に描画位置の移動が可能である。このため描画のフレームレートに依存することなく移動可能である。

また、WSLPの移動最大角度(40[deg])における最大応答周波数は約500[Hz]であり、頭部運動に対し十分追従可能であると考えられる。

次節からは上記の2点について従来のHMDとの比較実験を行う。

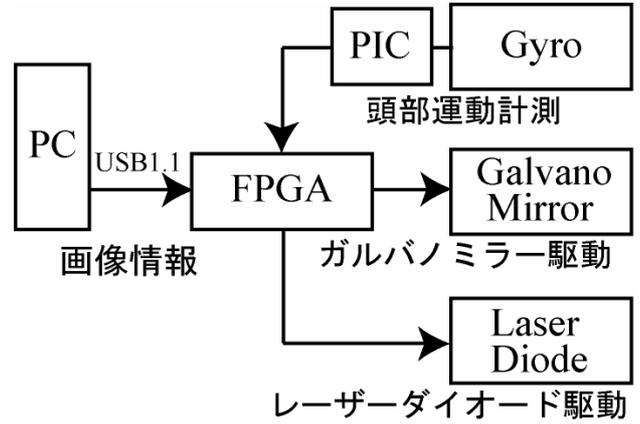


図8 ハードウェア構成図

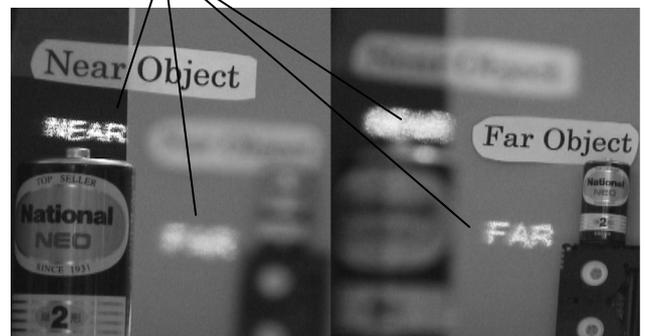
Fig. 8. Hardware composition.

### 4. 実験1：焦点の一致

WSLPでは対象物の距離にかかわらずバーチャル情報と対象物の焦点が一致する。図9は装着者の近傍の対象物に焦点を合わせた場合(a)の像と遠方の対象物に焦点を合わせた場合(b)の様子を示す。WSLPの投影像の焦点は対象物と一致していることが見て取れる。

本章では焦点一致の特性についてHMDと等価な固定焦点による提示とWSLPによる提示について視力測定法を利用して比較する。

WSLPの投影像



(a) 近傍に焦点を合わせた場合 (b) 遠方に焦点を合わせた場合

図9 WSLPによる焦点の一致

Fig. 9. The focus consistency by WSLP

### 4.1 実験概要

予備実験としてSee-through型HMD(MediaMaskオリンパス製)を使用して換算視力の計測を行なったが、解像度が低いため換算視力0.2~0.3程度しか得られなかった。また固定焦点距離は約1[m]であった。本実験では焦点不一致の場合における視力の低下度合いを明確にすることが目的のため、HMDと等価と考えられる1.0[m]の固定焦点をハーフミラーによって構成し、各視力毎に印刷された視力検査表(視

野角 1[ $\text{min}$ ]を視力 1.0 とする視力(0.1,0.2,0.3,0.4, 0.5,0.6,0.7,0.8,0.9,1.0,1.2,1.5,2.0)としたランドルト環)を提示した(図 10(a)). 検査法は 0.1 から順に小さな視票を読ませ, 読みとる最小の指標を換算視力(視角弁別閾 1[ $\text{min}$ ]を視力 1.0 とするランドルト環を距離と視力に応じて換算した)とし, 判定基準は一指標の半数以上正答できた視力値とした[22]. このとき被験者から注視点(対象物に記された+印)までの距離を変化させた. また, 被験者には注視点を注視(焦点が合うように)させ, ランドルト環の指標は焦点が指標に移動しないようにするため 100[ms]だけ提示した. 被験者は矯正された利き眼を使用し他眼は遮眼子で覆った. 被験者と注視点の距離を(0.4,0.6,0.8,1.0,1.2,1.4,1.6,1.8,2.0[m])として, 5[名]の被験者(平均年齢 29, 男性, 視力 1.2~1.5(矯正視力))に対して実施した. また同等のランドルト環を WSLP によって提示し被験者と注視点の距離を同様に变化させたときの換算視力を計測した(図 10(b)).

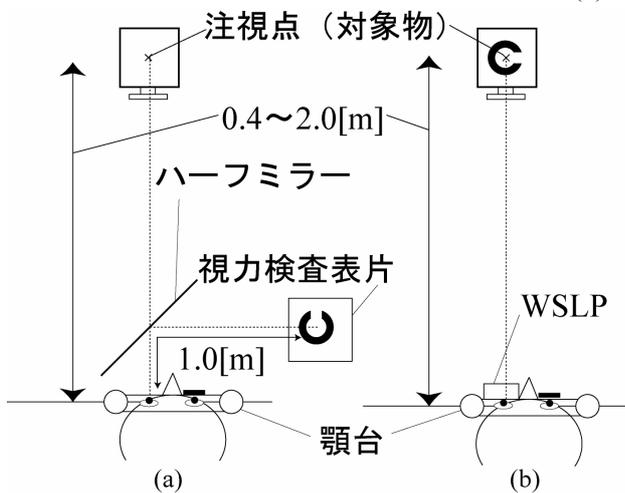


図 10 実験 1 : 等価的な視力の計測

Fig. 10. Exp.1: Measurement of equivalent eyesight

#### 4.2 実験結果と考察

各被験者の実験結果を表 1 に示す. また, 視力値には加法性が成立しないため, 物理値である視角弁別閾(逆数)に変換し, 被験者全員の平均と標準偏差を計算した結果を図 11 に示す.

図 11 より固定焦点において注視点位置が 1.0[m]より被験者から遠い場合と WSLP 全域において, 分散が小さいことから被験者の個人差は小さいと考えられる<sup>注1)</sup>.

注1) これに対して, 注視点位置が 1.0[m]より被験者から近い場合に標準偏差が増大している理由は視力の計測法において視力検査用のランドルト環指標の低視力計測時になるほど視角弁別閾(逆数)の刻み幅が大きくなることにも起因する. 例えば表 1 において固定焦点の注視点位置が 0.4[m]のとき被験者の視力は 0.1~0.2, 1.2[m]のときには 0.9~1.0 といずれも計測の最小単位である 0.1 のばらつきでしかないが, 視角弁別閾で換算した場合には約 10 倍の偏差量となる. したがって 0.4[m]のとき約 2.73[ $\text{min}$ ], 1.2[m]のとき約 0.06[ $\text{min}$ ]と視角弁別閾で約 45 倍になっている標準偏差の増大において, 視力低下に伴う標準偏差の増大は約 4.5 倍程度と見なせる.

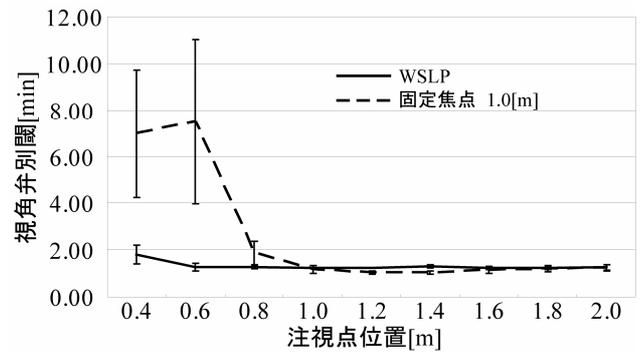


図 11 注視点位置と視角弁別閾の関係

Fig. 11. Relationship between angular subtense difference threshold and gaze point position.

また, 視力評価の観点から視角弁別閾の被験者全員の平均値から視力値に換算した結果を図 12 に示す.

図 12 より固定焦点の場合は注視点位置が固定焦点距離付近をピークとして遠近どちらに移動した場合においても視力値が低下しており, 特に固定焦点距離よりも注視点位置が被験者に近い場合に顕著に低下した. 一方で WSLP は注視点が遠方へ移動しても視力値に変化がないが, 被験者から 0.4[m]と近傍では視力値が低下した. この実験状況下では被験者から 0.4[m]におけるレーザーのビーム径は約 0.5[mm]であり, 2.0[m]におけるビーム径は約 1.5[mm]であった, これより, このレーザーは被験者の後方 1.3[m]を点光源として視角 1.01[ $\text{min}$ ]で照射していることと等価になるようにレンズによってコリメートされていると試算される. したがって, 被験者近傍ではランドルト環の隙間に比べてビーム径が無視できない太さとなり視認性が悪化し, 遠方になるにつれ改善ものと考えられる. 設計指針として近傍から遠方まで視力換算で 1.0 にするためには, 被験者の目の位置を光源とし視角 1[ $\text{min}$ ]で照射することと等価になるようにコリメートする必要がある.

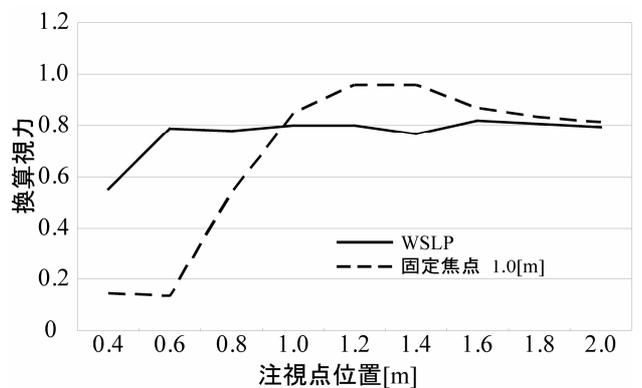


図 12 : 注視点位置と換算視力の関係

Fig. 12. Relationship between equivalent eyesight and gaze point position.

表1.注視点位置と等価視力の関係

注視点位置 [m]	換算視力 (焦点固定)					換算視力 (WSLP)				
	Subjects					Subjects				
	H.A.	H.K.	T.A.	T.B.	I.T.	H.A.	H.K.	T.A.	T.B.	I.T.
0.4	0.1	0.2	0.2	0.2	0.1	0.6	0.6	0.6	0.7	0.4
0.6	0.2	0.4	0.1	0.1	0.1	0.7	0.9	0.8	0.9	0.7
0.8	0.6	0.9	0.5	0.4	0.5	0.8	0.8	0.8	0.8	0.7
1.0	1.0	0.9	0.7	0.9	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
1.2	1.0	1.0	0.9	1.0	0.9	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
1.4	1.0	1.0	0.9	1.0	0.9	0.8	0.8	0.8	0.8	0.7
1.6	0.9	0.7	1.0	0.9	0.9	0.8	0.9	0.8	0.8	0.8
1.8	0.9	0.7	0.9	0.9	0.8	0.8	0.9	0.8	0.8	0.8
2.0	0.8	0.7	0.9	0.9	0.8	0.8	0.7	0.8	0.8	0.9

固定焦点の場合においてが実験開始前に行なった通常の視力検査 (全被験者の視力は 1.2 以上) に比べて焦点が同一の場合であっても視力約 1.0 と低くなった。この原因は 100[ms]の瞬間視であったことに起因すると考えられる。

一方, WSLP による被験者から 0.6[m]以上先の視力値は約 0.8 であった。仮にこの値を広視野角の HMD で実現する場合には膨大な解像度を必要とする。例えば視野角  $40 \times 30[\text{deg}]$ において視力値 0.8 の視認性を実現するためには  $3000 \times 1440$  [pixel]の解像度が要求される。

本論文で試作した WSLP では 2.0[m]先においても換算視力に影響はなかったが、レーザーは遠方に照射するほど輝度が低下し視認性が悪くなるので、より遠方に描画する必要がある場合には高出力のレーザーを使用する必要がある。

## 5. 実験 2 : 頭部運動追従の評価

WSLP は表示領域の移動がフレームレートに依存しない高速な応答特性を有していることから、本章の実験では頭部運動による実空間の対象物とバーチャル情報の位置ずれを補償する追従特性があることを確認する。またフレームレートを有するシステム (HMD やプロジェクター等) と位置ずれによるバーチャル情報の振れの幅を比較する。

### 5.1 実験概要

この実験では、頭部運動に見立てた回転台に WSLP を固定し、回転台の回転角度を正弦波状に駆動した (図 12)。回転台を駆動した状態で対象物 (方眼紙) にバーチャル情報を静止して重ね合わせが行えることを確認する。この実験では、頭部運動計測値に対する静止・安定性を評価するために回転台の回転角度 (回転駆動モータのエンコーダ値) を WSLP への制御入力とした。このときに静止・安定性の評価として回転角速度が変化したときにバーチャル情報の振れ (ブレ) の幅を計測した。回転台の回転角の振幅は  $10[\text{deg}]$ とし、日常生活における着座時の頭部運

動は約 97%が  $30[\text{deg}/\text{sec}]$ 以下[23]であることを考慮して  $5 \sim 70[\text{deg}/\text{sec}]$ とした。また、WSLP から対象物の距離を 2.8[m]とした。振れ幅は方眼紙 (対象物) から目視によって読みとった。

また、フレームレートによって画像が更新する HMD を想定し、フレームレートの遅れから振れ幅の理論値を計算した。この HMD の振れ幅の理論値と WSLP の振れ幅の実測値を比較する。

### 5.2 実験結果と考察

頭部運動の角速度と振れ幅の関係について、HMD のフレームレート ( $30, 60[\text{Hz}]$ ) による振れ幅と WSLP の実測結果の振れ幅を図 14 に示す。

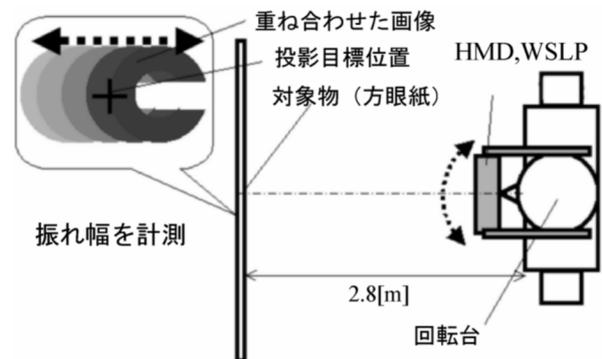


図 13 実験 2 : 頭部追従の評価

Fig. 13. Exp.2: Head response experiment

図 14 より、HMD の振れ幅の理論値に比べて WSLP では振れ幅が小さく抑えられていることが見て取れる。日常的な頭部運動速度を  $60[\text{deg}/\text{sec}]$ とすると 2.8[m]先の投影面に対して振れ幅は  $35[\text{mm}]$  (角度換算で約  $0.7[\text{deg}]$ ) 程度であった。

この結果から、頭部運動に対するバーチャル情報を対象物に固定するという点において WSLP はフレームレート毎に表示位置を更新するシステムに比べて有利であるといえる。

一方で、WSLP における実験では、ガルバノミラーの応答周波数から想定される理論値より悪化した。この原因はセンサからモータまでの処理の遅延にあ

ると考えられる。特にガルバノミラーの駆動ドライバの内部のノッチフィルタ等によって、位置指令入力から実際のモータ位置センサ出力までの応答に数[ms]の遅延があった。この遅延はガルバノミラーの追従制御ゲインを高くすることによって改善が可能であると考えられるが、ミラー駆動のためのモータに要求されるトルクが増すことに伴う重量増加等のデメリットもあり両者にはトレードオフがある。また、センサからのサンプリング処理やガルバノミラー指令値への変換処理等の遅延が追従性に影響を及ぼすことを考えると、実際のウェアラブル装着時に利用するセンサ（ジャイロセンサなど）についても高サンプリングレート、高精度が要求され、実用において重要な課題となると推測される。

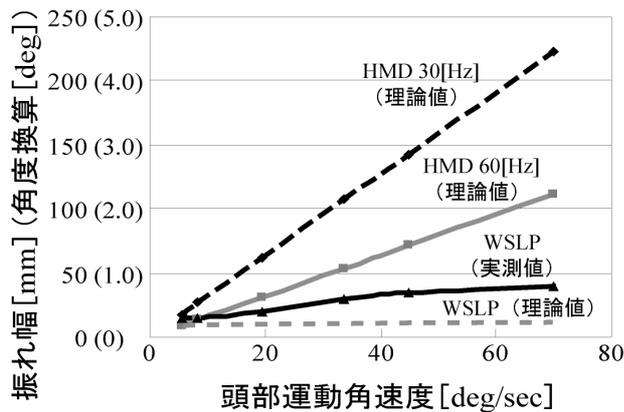


図 14 頭部運動角速度と振れ幅の関係

Fig. 14. Relationship between head movement angular speed and blur width

## 6. 利用における留意点

WSLP は直接的に対象物に対してバーチャル情報を投影するため、対象物やその近傍がスクリーンとして投影できない場合や対象が光量が大きく減衰するほど遠方の場合には直接投影による使用は困難である。また、スクリーンとなる対象物がレーザー光全反射する材質（鏡など）や極度に拡散する材質（曇りガラスなど）の場合にも可読性が低下する。このような場合においては、半透明の板を把持しスクリーンとして使用することにより、焦点一致の効果は失われるものの、従来の HMD と同様に使用することが可能である。

また、装着者のみが支援を受けるだけでなく、装着者の近傍にいる非装着者との情報の共有も可能である。ただし、非装着者から観察される提示情報が大きく歪まない範囲で対象物に投影しなければならない。また、複数の装着者が利用し、同時に同じ対象物に情報提示を行なった場合、投影が重なり視認性が悪化するため注意しなければならない。さらに、眼球の近傍にレーザー射出口があることや高速な可

動部が剥き出しになっていることに起因する心理的抵抗感を和らげるためにはカバーで覆うことが望ましい。

## 7. おわりに

本研究では、AR 情報提示システムにおいて、遠隔情報支援のための視覚情報提示ディスプレイを実現する上では、(1)常に作業対象と提示情報の焦点が一致、(2)注意視野全領域かつ高解像度の提示、(3)作業対象と提示情報の安定した位置の一致、の3点が重要であると考え、これを実現するためにレーザーで注釈情報を投影する手法を検討した。

しかし、広視野角かつ高輝度の表示は技術的に困難であることから、遠隔情報支援における注釈情報の重畳において適切な文字情報の分量を検討し、この分量の注釈情報を広域に移動するという手法によって、広視野角に視認性の高い注釈情報を提示する手法を考案した。

そして、これを実現する小型軽量のレーザープロジェクターである WSLP を提案、実現した。さらに実験によって常に作業対象と提示情報の焦点が一致すること、作業対象と提示情報の安定した位置の一致が可能であることを確認した。

本論文で提案しているような走査型のレーザー投影手法はバーコードリーダーのようにレーザーの反射光を検出することで実環境から情報を得ることも可能であると考えられ、このような用途の応用についても期待される。

## 参考文献

- [1] A brief history of wearable computing, <http://www.media.mit.edu/wearables/lizzy/timeline.html>
- [2] S. Feiner, B. Macintyre, D. Seligmann: "Knowledge-based augmented reality", Communications of the ACM, Vol. 36, No. 7, pp. 52-62, 1993.
- [3] M. Billinghurst, S. Bee, J. Bowskill, and H. Kato: "Asymmetries in collaborative wearable interfaces", In Proc. ISWC99, pp. 133-140, 1999.
- [4] 酒田 信親, 蔵田 武志, 興梠 正克, 葛岡 英明, マーク・ピリングハースト: "遠隔協調作業における肩載せアクティブカメラ・レーザーの利点と限界", 第 30 回 HI 学会研究会・日本 VR 学会ウェアラブル/アウトドア VR 研究委員会第 6 回研究会, Vol. 6, No. 5, pp. 17-22, 2004.
- [5] 福田忠彦: "生体情報システム論", 産業図書, 1995.
- [6] C. Aimone, A. Marjan, S. Mann: "EyeTap: Video-Based Featureless Projective Motion Estimation Assisted by Gyroscopic Tracking", Proc. of 6th Inter. Sympo. On Wearable Computers, pp. 90-100, 2002.
- [7] N. Sakata, T. Kurata, T. Kato, M. Kourogi, and H. Kuzuoka: "WACL: Supporting telecommunications using wearable active camera with laser pointer" In ISWC 2003, pp. 53-56, 2003.
- [8] 杉原 敏昭, 宮里 勉, 中津 良平: "焦点調節補償機能を有

する HMD:3DDAC Mk.4”, 日本 VR 学会論文誌, Vol.4, No.1, pp.261-268, 1999.

- [9] 神原 誠之, 横矢 直和, 竹村 治雄: “マーカと自然特徴点を併用した広範囲見回し可能なステレオビデオシーンスルー拡張現実感”, 日本 VR 学会論文誌, Vol. 7, No. 3, pp. 367-373, 2002.
- [10] Kijima R., Ojika T.: “Reflex HMD to compensate lag and correction of derivative deformation”, Proc. of IEEE Virtual Reality, pp.172-179, 2002.
- [11] Chinthammit, W., Seibel, E.J. and Furness, T.: “Unique Shared-Aperture Display with Head or Target Tracking”, In Proceedings of IEEE VR 2002, pp.235-242, 2002.
- [12] 白木邦彦, 安成隆治, 田淵仁志, 三木徳彦, 安東孝久, 中村肇, 山口成志, 志水英二: “マックスウェル視を用いたロービジョン用網膜投影装置の開発”, 臨床眼科 56(4), pp.466-469, 2002.
- [13] Nomad Expert Technician System  
<http://www.mvis.com/nomad/index.html>
- [14] 稲見昌彦, 川上直樹, 柳田康幸, 前田太郎, 舘暲: “マックスウェル光学系による広視野立体ディスプレイ”, 日本 VR 学会論文誌, Vol.4, No.1, pp.287-294, 1999.
- [15] T. Karitsuka and K. Sato: “A wearable mixed reality with an on-board projector”, In Proc. ISMAR 2003, pp. 321-322, 2003.
- [16] M. Inami, N. Kawakami, D. Sekiguchi, Y. Yanagida, T. Maeda, and S. Tachi: “Visuo-haptic display using headmounted projector”, In Proc. IEEE VR 2000, pp. 233-240, 2000.
- [17] Preliminary Concept: Laser Projection Display (LPD)  
<http://www.symbol.com/products/oem/lpd.html>
- [18] 伴好弘, 佐藤宏介, 千原國宏: “強調現実感による電子部品検査の作業支援環境”, 日本 VR 学会論文誌, Vol.3, pp.185-191, 1998.
- [19] 伴好弘, 中島 健, 眞鍋佳嗣, 佐藤宏介, 千原國宏: “ウェアラブル拡張現実感のためのナビゲーション情報呈示に関する検討 -天体観察支援システムを用いて-”, 日本 VR 学会論文誌, Vol.6, No.2, pp.89-98, 2001.
- [20] Rayner, K. and J.H. Bertera: “Reading without a fovea”, Science 206, pp.468-469, 1979.
- [21] Edwards D.C., Goolkasian P.A.: “Peripheral vision location and kinds of complex processing”, Journal of Experimental Psychology, pp. 244-249, 1974.
- [22] 丸尾 茂雄, 湖崎 克, 所 敬, 西信 元嗣, 加藤 桂一郎: “屈折異常と眼鏡”, 医学書院, 1993.
- [23] 北林一良, 加納浩行, 木島竜吾: “日常生活における頭部運動の解析”, 日本 VR 学会第 8 回大会論文集, pp. 135-136, 2003.

(2005 年 1 月 17 日受付)

[著者紹介]

安藤 英由樹 (正会員)



1998 年 愛知工業大学大学院 工 電気電子工 修士課程修了. 1998 年 同大学工学研究科 電気材料工博士課程. 1999 年 理化学研究所 BMC JRA 配属. 2000 年 JST 「協調と制御」領域グループメンバーとして東大情報学環研究員を経て現在 NTT コミュニケーション科学基礎研究所 リサーチアソシエイト. 生体工学, 人間の知覚特性に基づくヒューマンインタフェースなどの研究に従事. 2004 年 SICE SI 部門 奨励賞, 2005 年日本機械学会ロボメック賞受賞. 博士 (情報理工学)

雨宮 智浩 (正会員)



2002 年東京大学工学部機械情報工学科卒業, 2004 年同大学大学院情報理工学系研究科博士前期課程修了, 同年日本電信電話株式会社入社. 現在 NTT コミュニケーション科学基礎研究所にてウェアラブルインタフェース, 人間の知覚特性を利用した力触覚の錯覚現象の解明, 五感伝送に関する研究に従事. 2004 年日本 VR 学会学術奨励賞受賞.

前田 太郎 (正会員)



1987 年 東大・工・計数工卒. 工博. 同年通産省工業技術院機械技術研究所. 1992 年 東大先端科学技術研究センター助手, 1994 年 同大大学院・工助手, 1997 年 同大大学院・工講師, 2000 年 同大大学院情報学環講師. 2002 年 NTT コミュニケーション科学基礎研究所主幹研究員. 人間の知覚特性・神経回路のモデル化, テレレジスタンスの研究に従事. 計測自動制御学会論文賞, 学術奨励賞, 日本ロボット学会技術賞受賞.