

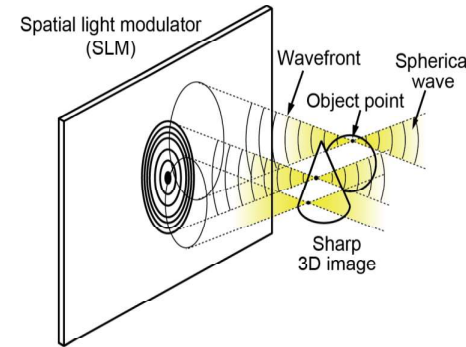
3Dディスプレイの新たな展開 ～波面再生か光線再生か～

東京農工大学
大学院工学研究院

高木康博

波面再生 v.s. 光線再生

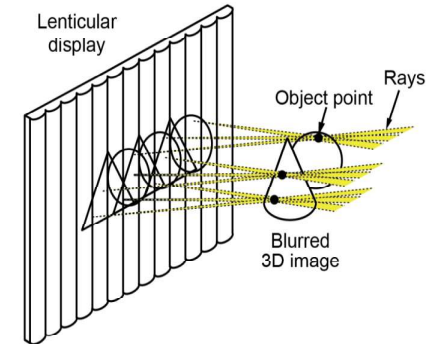
【波面再生】
ホログラフィー



光を波として扱う

【光線再生】

多眼式、インテグラルイメージング、
ライトフィールド



光を光線として扱う

ビデオ

【波面再生】



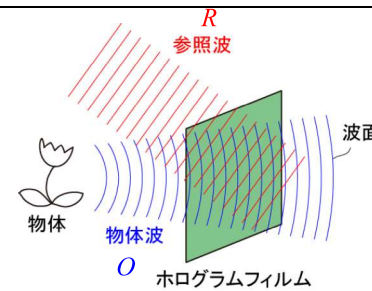
光学的ホログラフィー
(電子的ホログラフィーではない)

【光線再生】



レンチキュラディスプレイ

ホログラフィーの原理



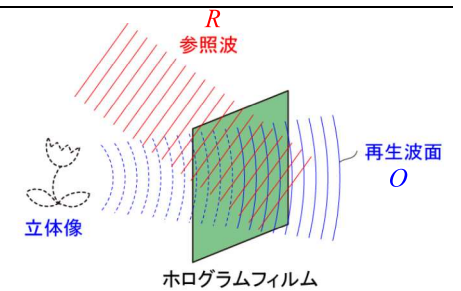
【記録プロセス】

$$I = |O + R|^2$$

干渉縞

$$= |O|^2 + |R|^2 + OR^* + O^*R$$

波面(複素振幅分布) → 強度分布



【再生プロセス】

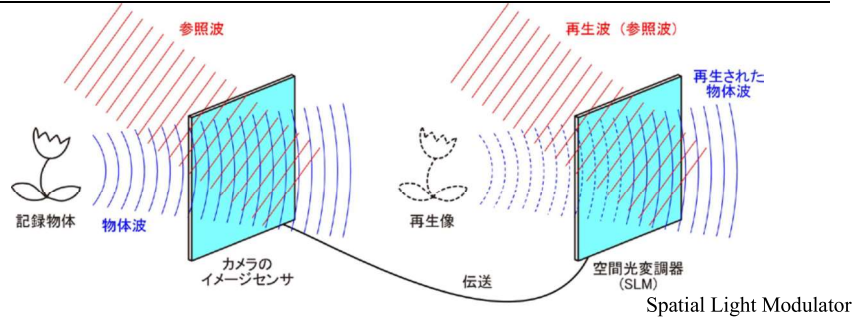
$$RI = |O + R|^2 R$$

$$= R(|O|^2 + |R|^2) + O|R|^2 + O^*R^2$$

ゼロ次回折光 再生された物体波 共役像

強度分布 → 波面(複素振幅分布)

電子的なホログラフィー



ホログラムの記録

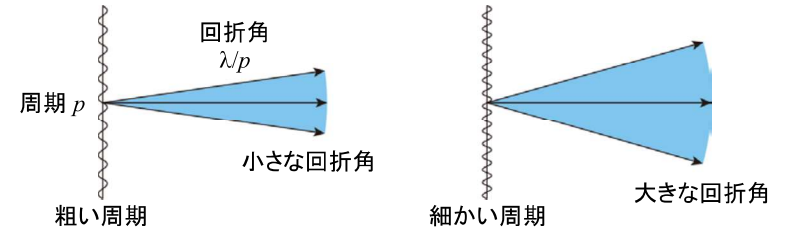
世界初の実時間ホログラフィー
橋本、諸川、光学 15, p.158 (1992)

イメージセンサ	
撮像領域	0.5 inch (対角)
画素数	768(H) × 490(V)
画素ピッチ	11.4 μm × 13.3 μm
出力信号	複合ビデオ信号

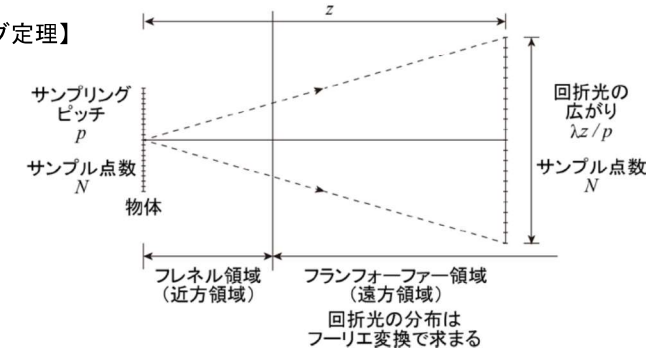
ホログラムの再生

空間光変調器	
サイズ	0.96 inch (対角)
画素数	648(H) × 240(V)
画素ピッチ	30 μm(H) × 60 μm(V)
モード	MIM-TN 型
セルギャップ	4 μm
開口率	68%
パターンスペース	4 μm × 13 μm
入力電圧	7V
信号源	複合ビデオ信号 4V _{P-P}

光の回折



【回折のサンプリング定理】



電子的なホログラフィーの課題

空間光変調器 (SLM)

ピクセルピッチ p

視域角: $\Phi = 2\sin^{-1}(\lambda/2p)$

画面サイズ: $Np \times Mp$

SLMの画素ピッチ: p

SLMの解像度: $N \times M$

光の波長: λ

0.4~0.8 μm (可視光) 波長 λ

物体点

球面波

視域角

実用的なホログラム表示実現のためには、波長オーダーの画素ピッチと膨大な画素数が必要になる。

例: 画面サイズ40", 視域角60°の場合

画素ピッチ: $p = 0.50 \mu\text{m}$

解像度: $N \times M = 1,771,000 \times 996,000$

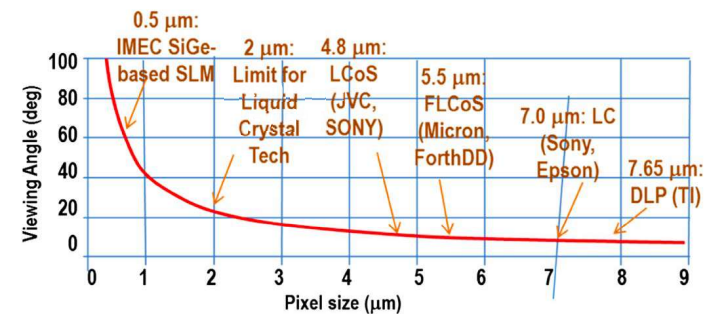
($\lambda = 0.5 \mu\text{m}$ の場合) スーパーハイビジョンの約200×200倍

現状の解像度:

フルHD: 1,920 × 1,080

スーパーハイビジョン(8K4K): 7,680 × 4,320

空間光変調器の画素ピッチ

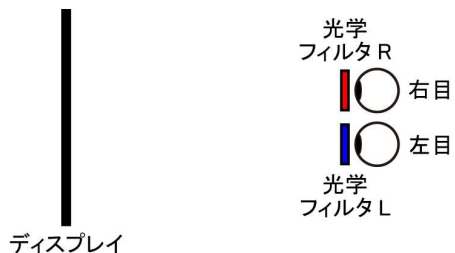


J. Geng, Adv. Opt. Photo. 5, 456 (2013)

裸眼立体表示

空間に視点を発生することで、メガネなしを実現する。

【メガネ式】

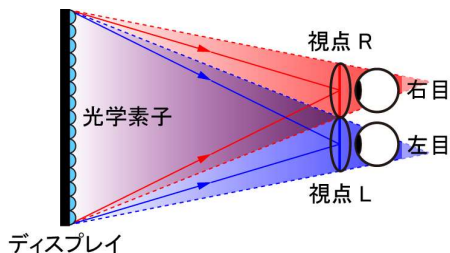


ディスプレイ
光学フィルタで、右目用と左目用の画像を分離する。



偏光フィルタ 液晶シャッター

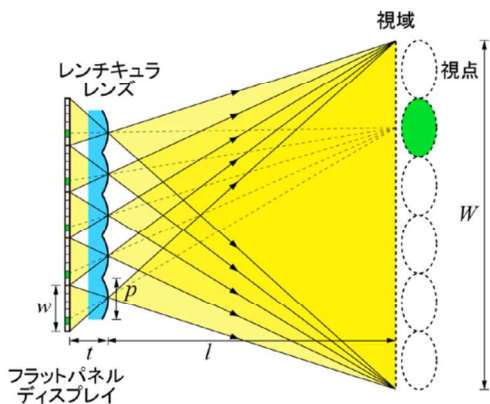
【裸眼式】



ディスプレイ
右目と左目を置いて見る視点を空間に設定する。
各視点に集光する光線で、右目用と左目用の画像を表示する。

多眼式立体表示

1つのレンズに3ピクセル以上を対応させ、3視点以上を発生する。
視域が拡大する。



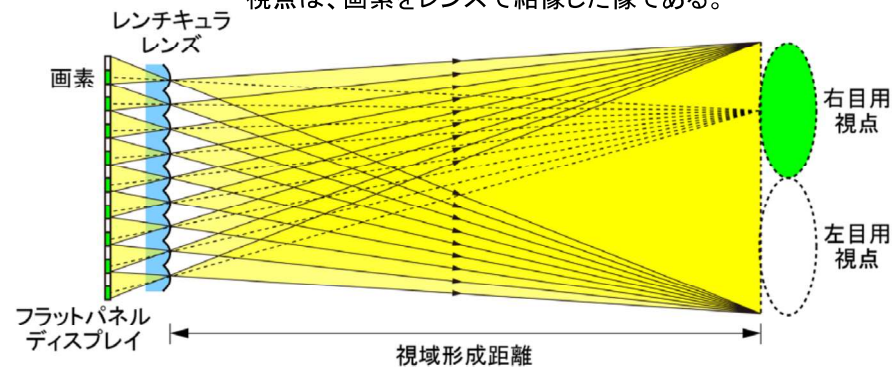
視域
視点
視点の水平間隔は、両眼間隔(平均65mm)、その半分程度にする。

それぞれの視点位置から見た画像(視差画像)を表示する。
→運動視差の実現

視点数に反比例して解像度が低下

2眼式立体表示

1つのレンズに2画素を対応させ、2視点を発生する。
視点は、画素をレンズで結像した像である。



すべてのレンズが、対応するフラットパネル上の領域を、視点形成距離で多重結像する。
→視域の形成

レンズが立体表示の1画素になる → 解像度が半分になる

多眼式立体ディスプレイの例



Newstight
8眼
パララックスバリア方式



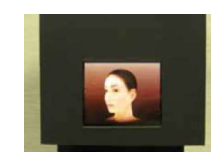
三洋電機
4眼、7眼
パララックスバリア方式



Philips
9眼
レンチキュラ方式



NTTドコモ
30指向性
レンチキュラ方式



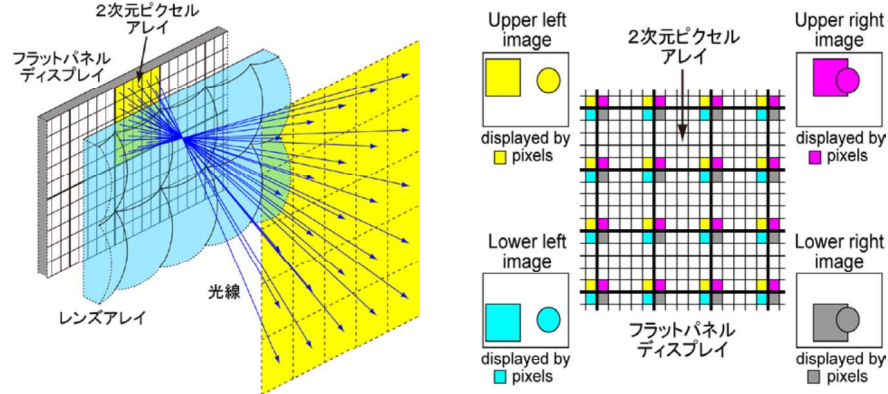
セイコーエプソン
8眼 2.57"
レンチキュラ方式



55X3
フルHDを超える(レグザ)。
ガラスレス3D搭載4K2K*高画質
東芝
9眼
レンチキュラ方式

インテグラルイメージングの原理

水平視差と垂直視差の両方(フルパララックス)を有する立体表示方式
2次元のレンズアレイを利用



歴史的には、インテグラルフォトグラフィーと呼ばれる。
多眼式に比べて解像度が低い。
視点を用いて立体表示と考えるのではなく、光線を再現すると考える
→ ライトフィールドディスプレイ

インテグラルイメージングのハードウェア

NHK

超高精細なフラットパネルディスプレイ、
プロジェクタを用いる。

日立

多数の小型プロジェクタを用いる。

レンズアレイ
400 × 250

スーパーハイビジョン
プロジェクター
7,680 × 4,320

プロジェクタアレイ
SVGA プロジェクタ93台

上視点

左視点

右視点

下視点

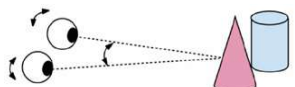
Upper

Left

Right

Lower

立体視<生理的要因>



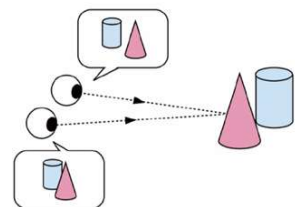
【輻輳】

一点を注視したときの左右の眼の回転角から3角測量の原理で奥行きを知覚



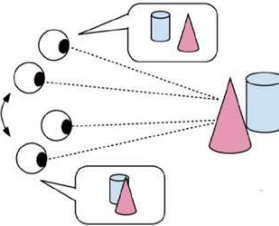
【調節】

眼のピント合わせによる奥行き知覚



【両眼視差】

左右の眼の網膜像の対応点の水平ずれ量による奥行き知覚



【運動視差】

視点移動による網膜像の変化にもとづく奥行き知覚

無意識のうちに機能するので、
立体ディスプレイの表示装置の開発で重要

現在の立体表示の問題点

輻輳・調節矛盾による視覚疲労が生じる。
輻輳による奥行き知覚位置と、調節による目のピント合わせ位置が一致しない。→ 視覚疲労

J. Semmlow, D. Heerema, "The synkinetic interaction of convergence accommodation and accommodative convergence," Vision Research, vol. 19, no.11, pp.1237-1242 (1979).

調節による奥行き知覚位置

輻輳性調節

調節性輻輳

輻輳による奥行き知覚位置

朝日新聞2010年
4月10日1面

「目に優しい3D」指針

国と業界規格作り

3Dで目が疲れる仕組み
右目に入る画像
左目に入る画像

目のピントは画面に合う

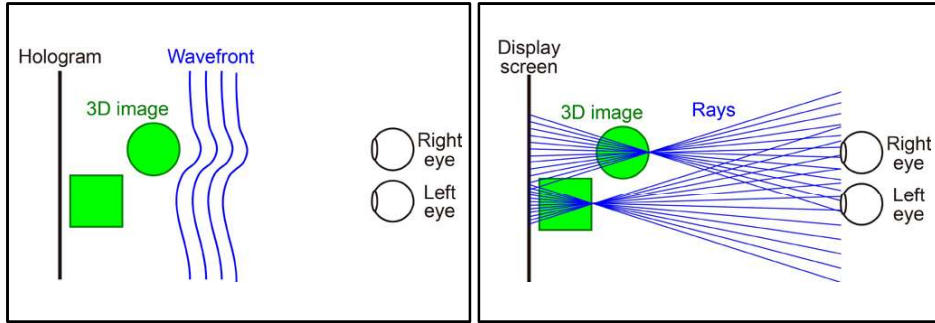
リンゴの画像は画面から飛び出して見える

波面再生 v.s. 光線再生

輻輳調節矛盾の解決という観点から、波面再生と光線再生を比較する。

波面再生

光線再生

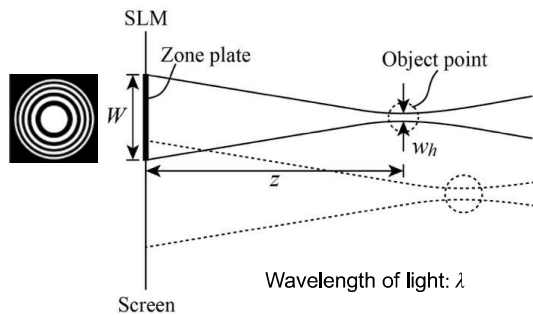


ホログラフィー

多眼式
インテグラルイメージング

ホログラム表示の画像ぼけ

立体像は物体点の集まりと考える。
球面波を発生するゾーンプレートを用いて物体点を表示する。



ゾーンプレートの位相分布:

$$\phi = \frac{\pi}{\lambda z} (x^2 + y^2)$$
 SLMの画素ピッチ: p

$$\left| \frac{\partial \phi}{\partial x} \right| p \leq \pi$$
 サンプリング定理
 ゾーンプレートの大きさ:

$$W = 2\lambda z/p$$

 物体点のビーム径:

$$w_h = 1.22 \lambda z/W = 0.61p$$

画像ぼけ: ...
波長や物体点までの距離によらない。

SLMに必要な画素ピッチは、それほど小さくない。1 μmは不要！
しかし、視域を広げる方法が必要になる。

比較方法

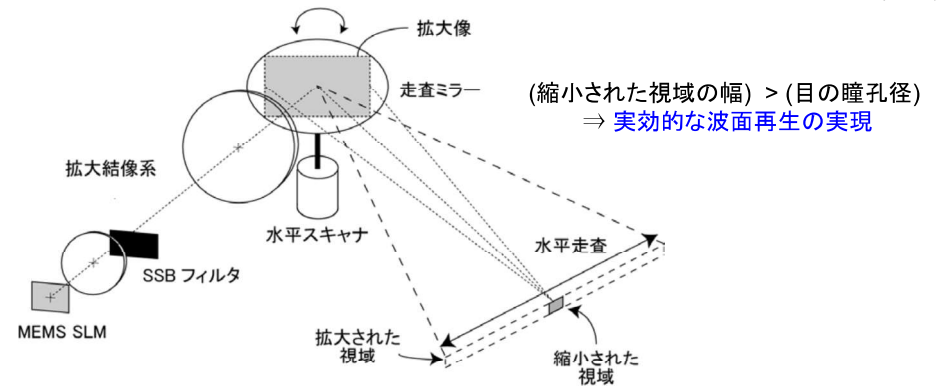
光線再生と波面再生を、輻輳調節矛盾の解決という観点で比較する。

目がピント合わせできるシャープな立体像を発生するには？

そのために、立体像のぼけを0.1 mm以下にすることを考える。

MEMS SLMを用いた視域走査型ホログラフィー

Y. Takaki et al., Opt. Express 22, 24713 (2014)



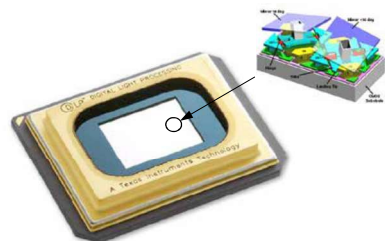
拡大結像系による画面サイズの拡大
 ⇒ 画素ピッチ拡大 ⇒ 視域縮小
 縮小された視域を水平スキャナで走査
 ⇒ 視域拡大

視域走査型ホログラフィーのデバイス

MEMS SLM

DMD Discovery™ 3000
(Texas Instruments Inc.)

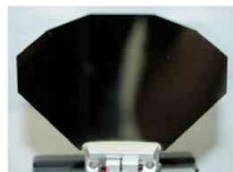
フレームレート: 13.333 kHz
画素ピッチ: 13.68 μm
解像度: 1,024 × 768 (XGA)



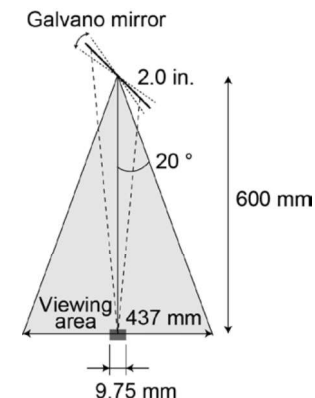
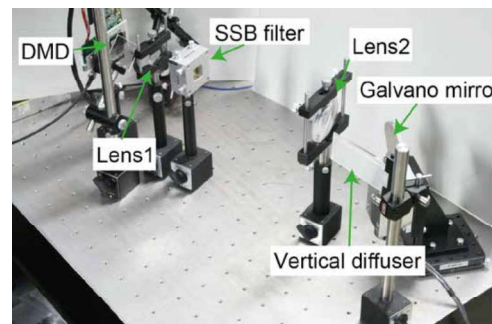
水平スキャナ

ガルバノミラー
(Cambridge Technology, Inc.)

走査角: ± 20.0°
ミラーサイズ: 40.0 × 30.0 mm² (φ 50 mm)
走査周波数: 60 Hz



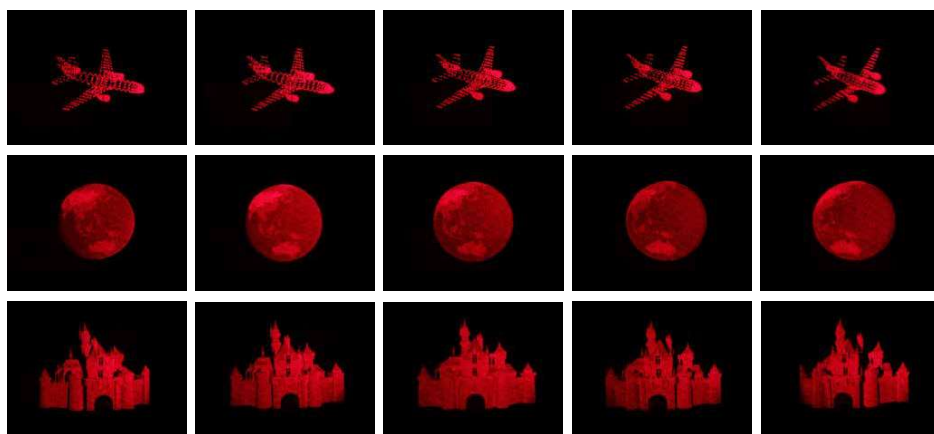
視域走査型ホログラフィーの実験装置



拡大率: 2.86
拡大された画素ピッチ: 39.1 μm
画面サイズ: 40.0 × 30.0 mm² (2.0 in.)
拡大された視域幅: 437 mm (at 600 mm)
視域角: 40°
フレームレート: 60 Hz
縮小された視域の幅: 9.75 mm (> 平均瞳孔径 5 mm)

ホログラム数/走査: 222

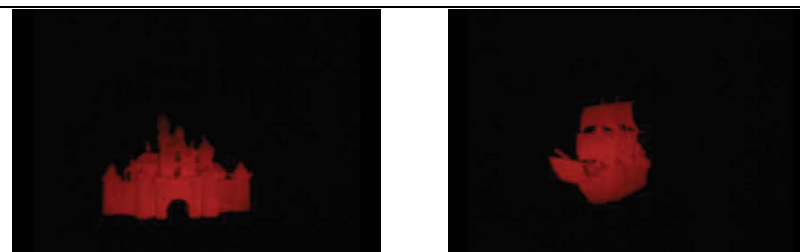
視域走査型ホログラフィーの再生像



-20° -10° 0° +10° +20°
画面サイズ: 40.0 × 30.0 mm² (2.0 in.)
視域角: 40.0°
視域の幅: 437 mm (at 600 mm)
フレームレート: 60 Hz

ホログラムパターンへの2値化には誤差拡散法を用いた。
Y. Matsumoto and Y. Takaki, Opt. Lett. **39**, 3433 (2014).

視域走査型ホログラフィーの再生像



カメラの焦点を変えて撮影
3D: +100 mm
TUAT: +30 mm
Circle: -100 mm

