

画像メディア工学特論(7)

3次元計測（奥行き計測）とカメラの幾何学

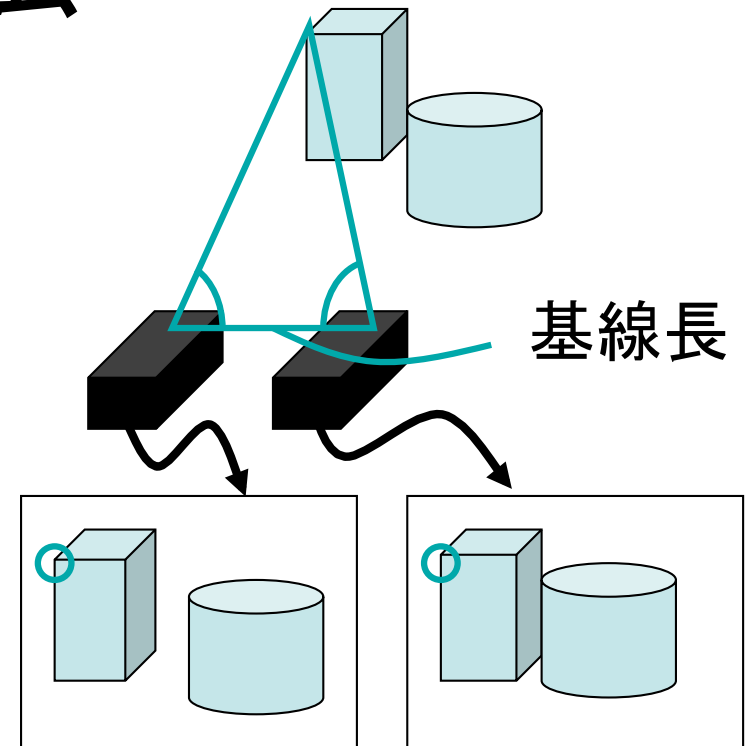
今回の内容

- 奥行きを推定する原理
 - 三角測量に基づく方法
 - 光の飛行時間を利用する方法
- 様々な三次元計測法
 - 各種ステレオ法
 - レンジファインダ
 - その他の方法
- カメラの幾何学（次回かな？）
 - 3次元空間と2次元画像の関係
 - カメラの数式表現
 - カメラの各パラメータの推定（キャリブレーション）

ステレオ法

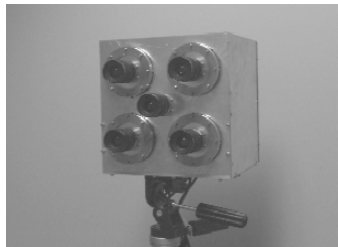
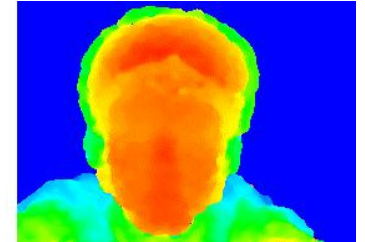
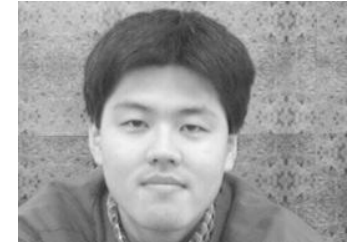
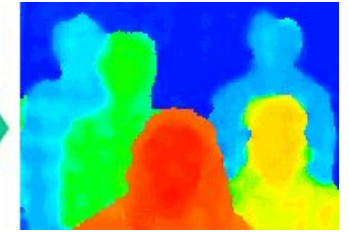
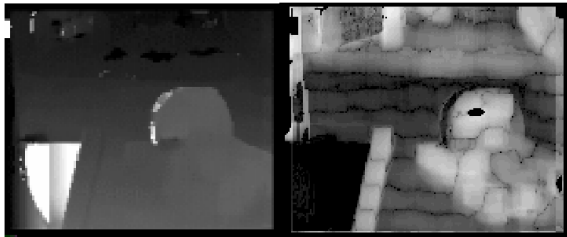
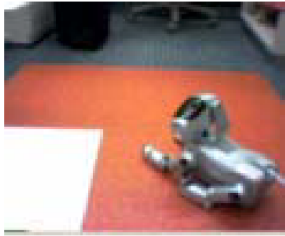
- ステレオ計測

- 二つ以上の視点を使用
(人間の両目に相当)
- 左右の画像の「ずれ」を利用
(三角測量法)
- 太陽光・室内照明などが
必要
- テクスチャのない平坦な部分の距離計測が困難
例: 真っ白な壁や滑らかで曲面的な物体
- 実質的な空間分解能が低い
- 対応点探索の計算量が大きい・安定度が低い

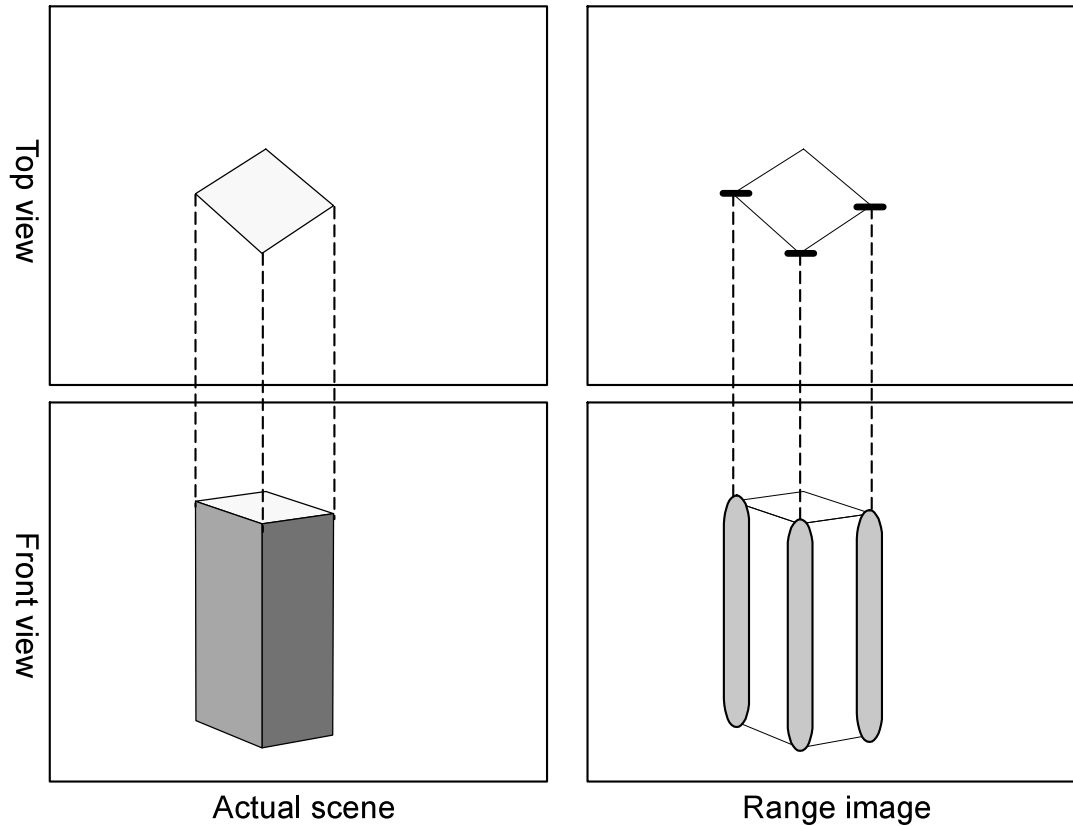


→ハードウェアによる高速化・多眼による安定化

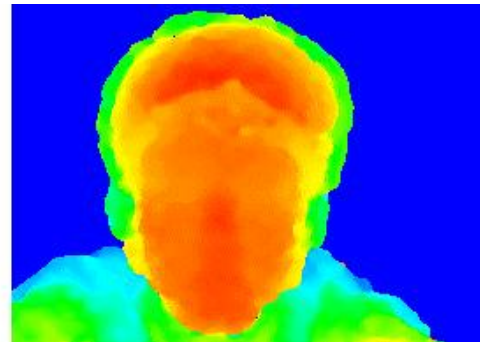
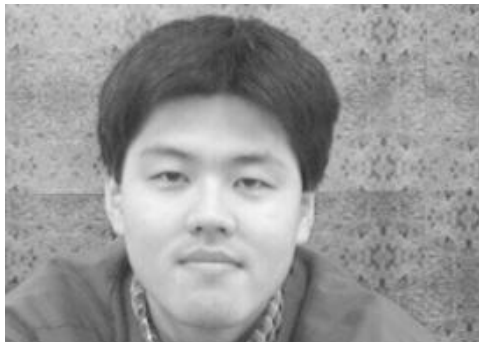
ステレオ法



受動型ステレオ法の問題点

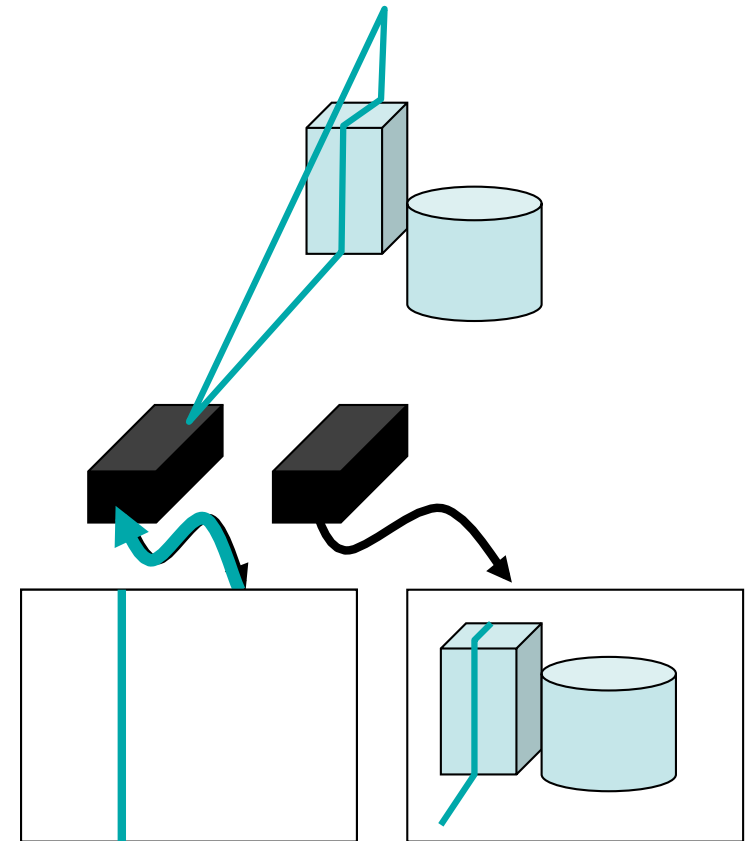


- テンプレートサイズに関するトレードオフ
 - テンプレート大 解像度の低下
 - テンプレート小 対応付けの不安定化



能動型ステレオ法

- 一方のカメラをプロジェクタに置き換える(光を投影)
 - もう一方のカメラでその光パターンの像を計測
 - 対応付け問題が簡単に
 - 模様のない物体でも計測可能
 - パターン光を投影しながら画像を取り込む
 - 画像の取り込み回数が多く、時間がかかる



→ハードウェアによる高速化・投影光の工夫等

レンジファインダの高速化

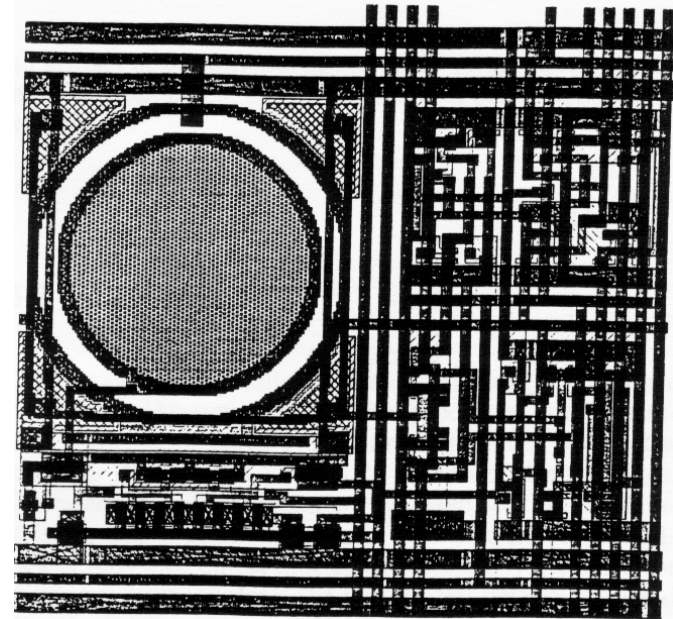
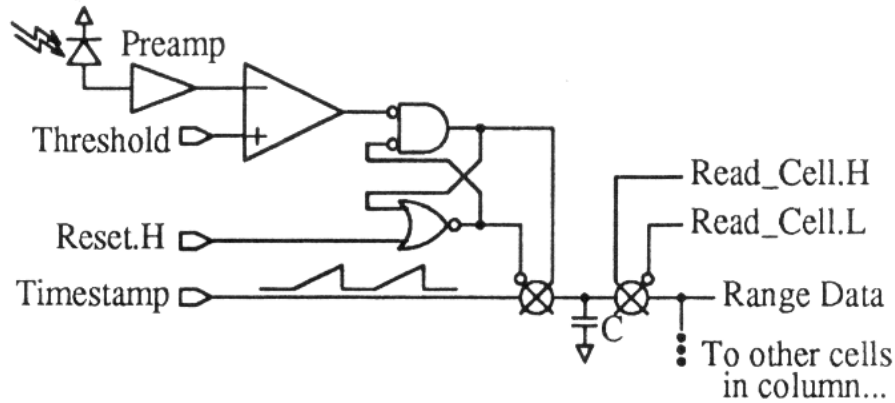
- スリット光投影法: フレームレートの限界
 - 計測時間 =
奥行き分解能(スリット数) × 1コマの撮影時間
(通常のカメラで 30slit/sec)
- 高速化法
 - フレームレートの向上
 - スリット位置を明度変化に置き換えるための
光学的な工夫
 - 空間コード化法

専用受光素子による高速化

- フレームレートの向上
 - 各画素へのアンプの内蔵
 - 二値読み出し
 - 回路によるスリット位置の算出
- スリット通過時刻の変換・記憶
 - スリット通過時刻を回路で電圧に置き換える

専用LSIによる光切断法の高速度化(1)

- アナログ方式(1991,CMU)



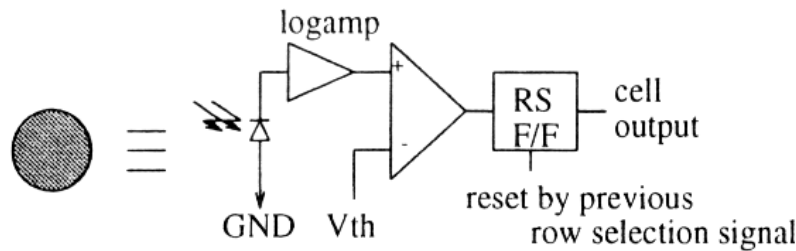
1セルのフロアレイアウト

- 特徴：
 - 各セルの回路構成
 - 28x32画素, 100~1000frames/sec
 - 画像センサの出力(画素値)が距離に対応
- 欠点：
 - アナログ値で記憶するため, 精度低下の恐れがある
 - 固定しきい値を利用しているため, 背景光の変動等に弱い

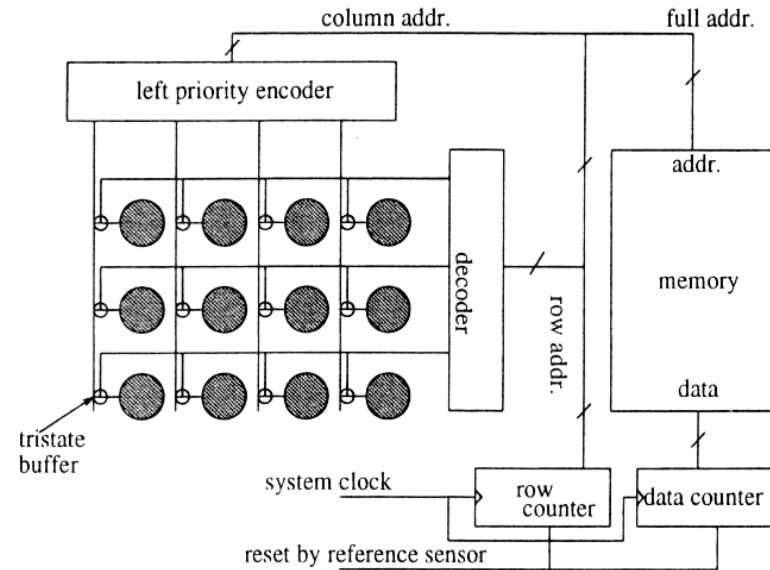
T. Kanade, A. Gruss and L.R. Carley, "A Very Fast VLSI Rangefinder," Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation (ICRA), Vol. 2, pp. 1322-1329, 1991.

専用LSIによる光切断法の高速度化(2)

- デジタル方式(1995)



各画素の構成



チップ全体の回路構成

- 特徴:

- 32x32画素
- デジタル的原理, チップからはスリット位置(座標値)が出力される

- 欠点:

- 固定しきい値を利用しているため, 背景光の変動等に弱い
- スリットの太さについて考慮していない

S. H. Kang, Y. D. Seo,
K. S. Hong and O. H. Kim,
"A High Speed Digital Range
Imaging Sensor,"
Proc. of Asian Conf. on Computer
Vision (ACCV), pp. III-490-493, 1995.

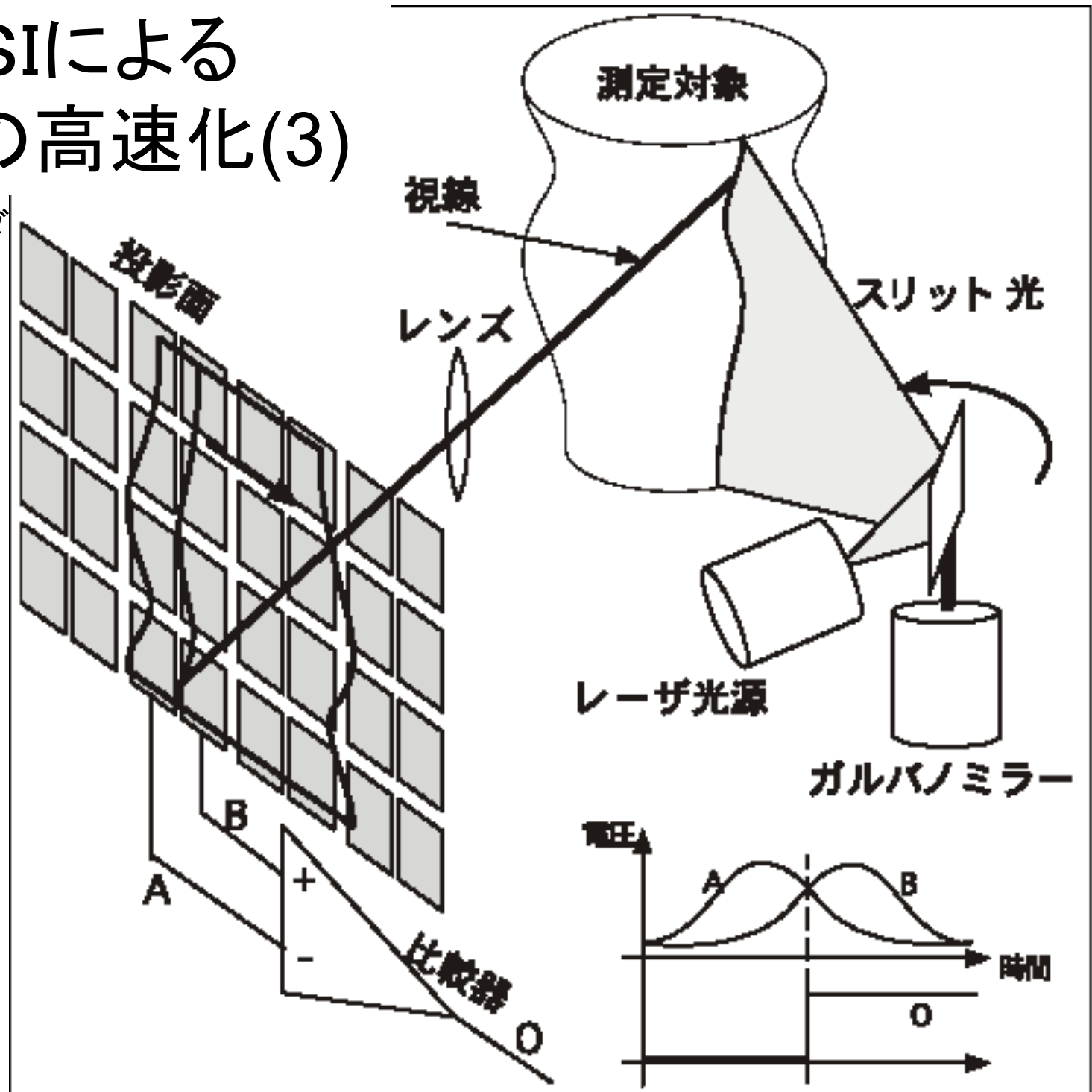
専用LSIによる 光切断法の高速度化(3)

シリコンレンジファインダ
(1994, 阪大/ソニー)

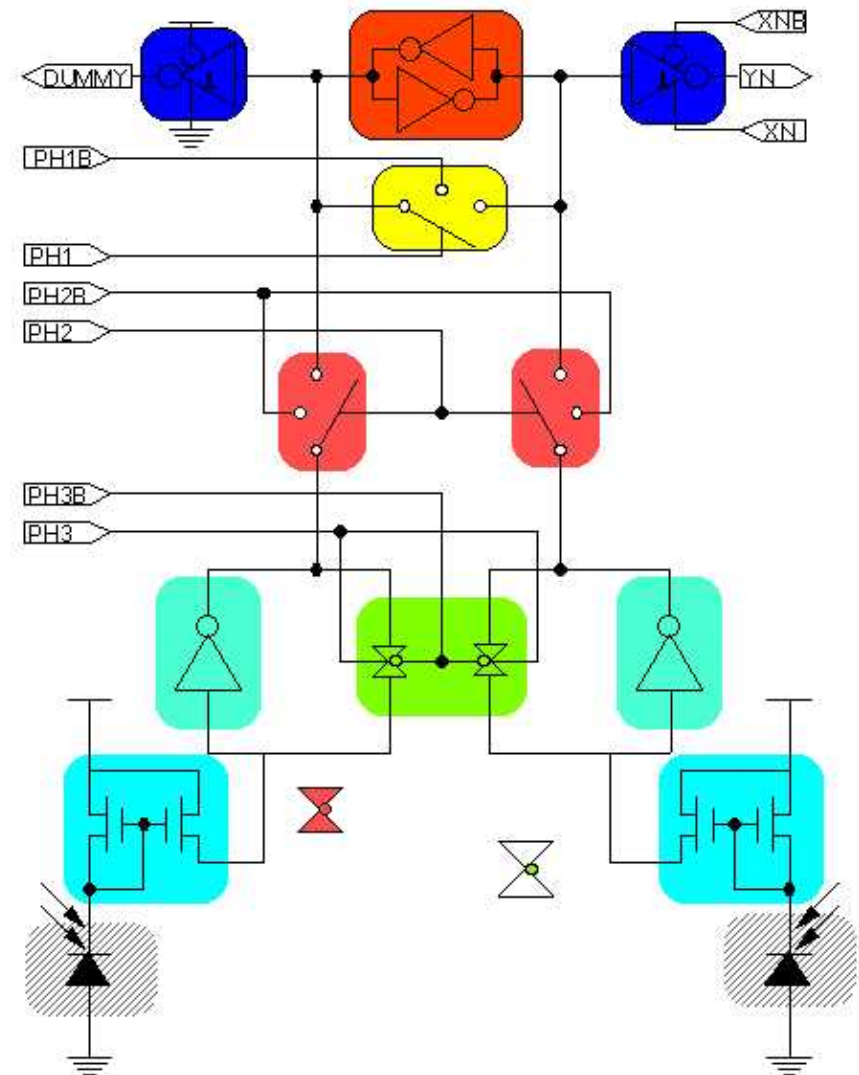
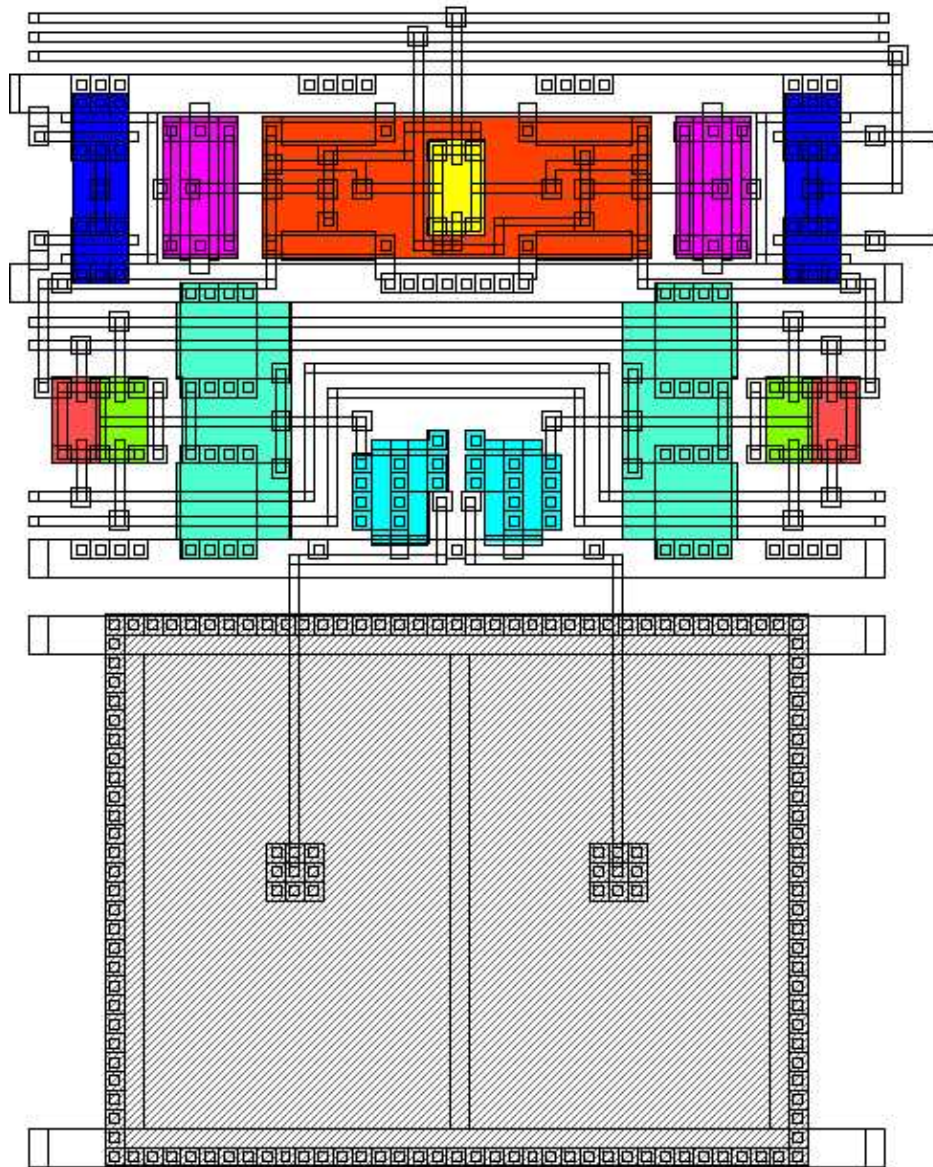
- 特徴:
 - 24x24画素
 - デジタル的
 - スリットのピーク通過を検出可能

A. Yokoyama, K. Sato,
T. Yoshigahara and S. Inokuchi,
"Realtime range imaging using
adjustment-free photo-VLSI,"
Proc. of Intelligent Robotics and
Systems, pp.1751-1758, 1994.

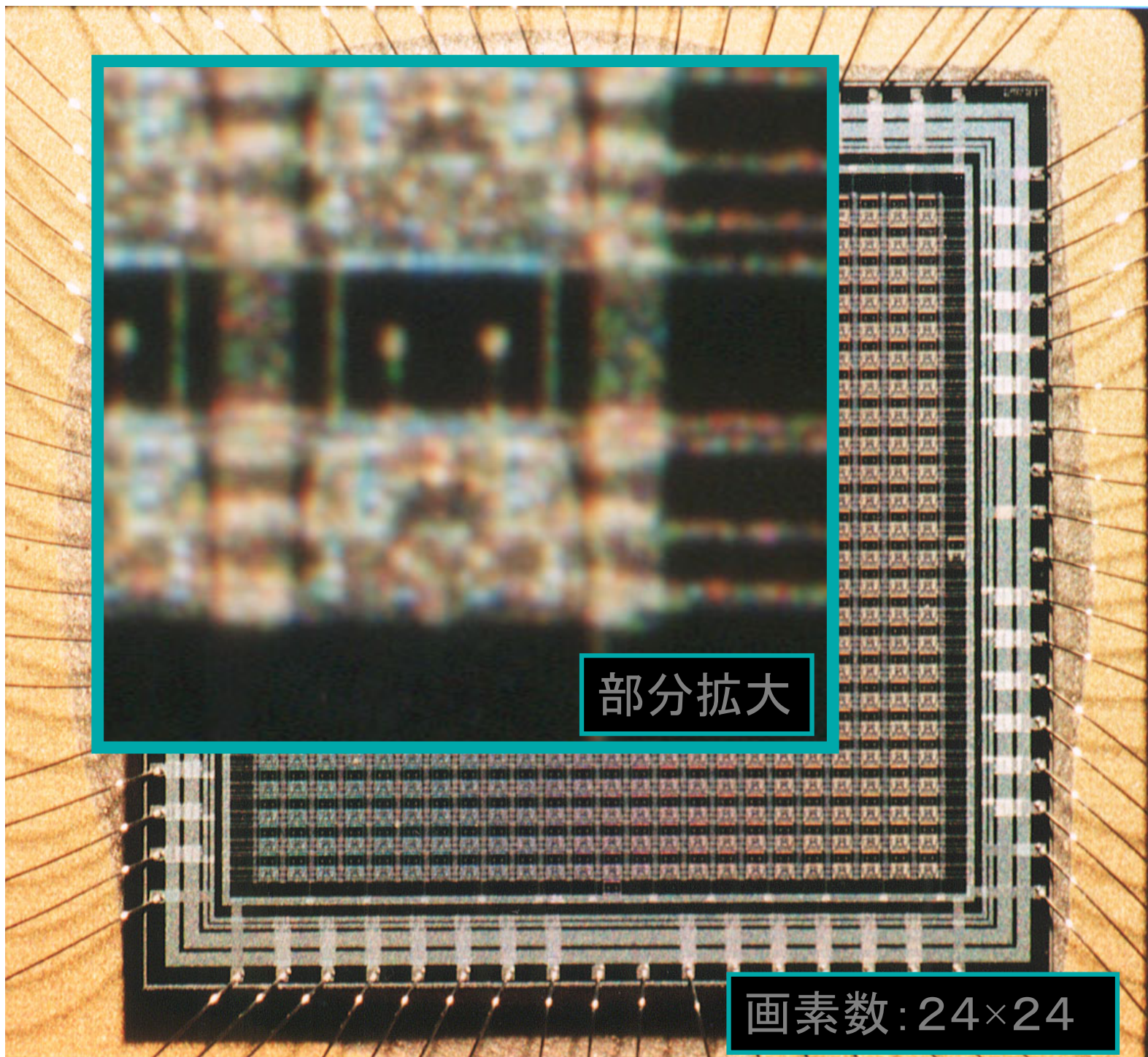
横山敦, 佐藤宏介, 芦ヶ原隆之,
井口征士, "無調整型フォトVLSI
センサを用いた実時間距離画像
計測--シリコンレンジファインダ--",
信学論D-II, No.9, pp.1942-1500,
1996.



シリコンレンジファインダの フロアレイアウト



LSIチップの写真



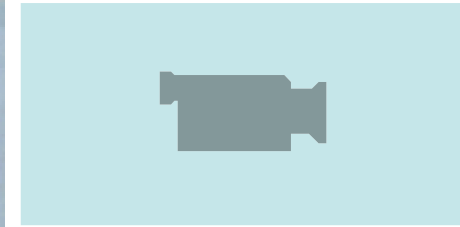
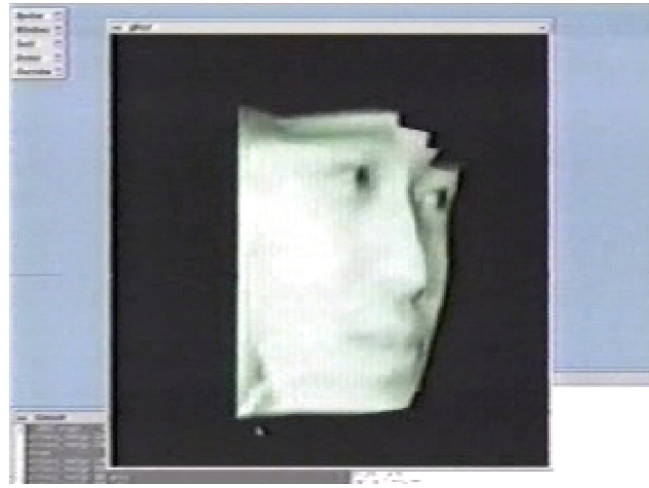
部分拡大

画素数: 24x24

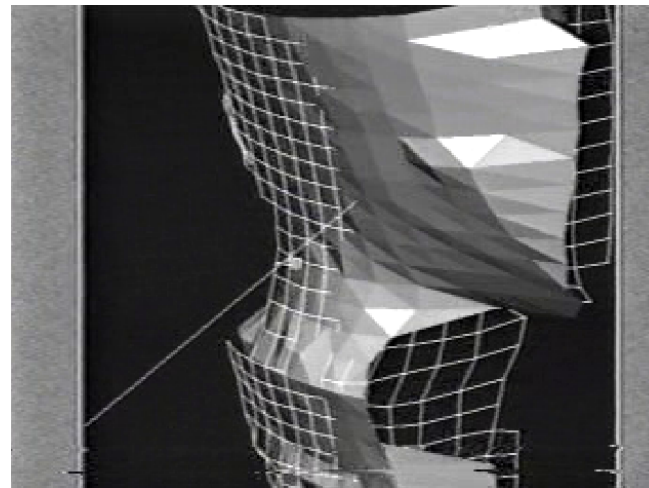
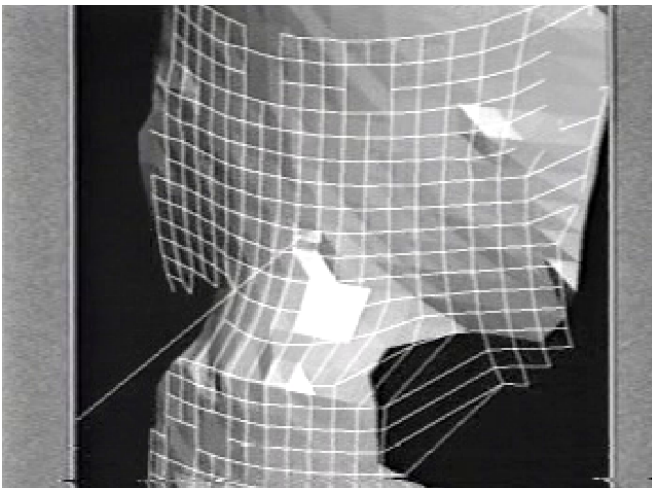
シリコンレンジファインダ



シリコンレンジファインダ動作例

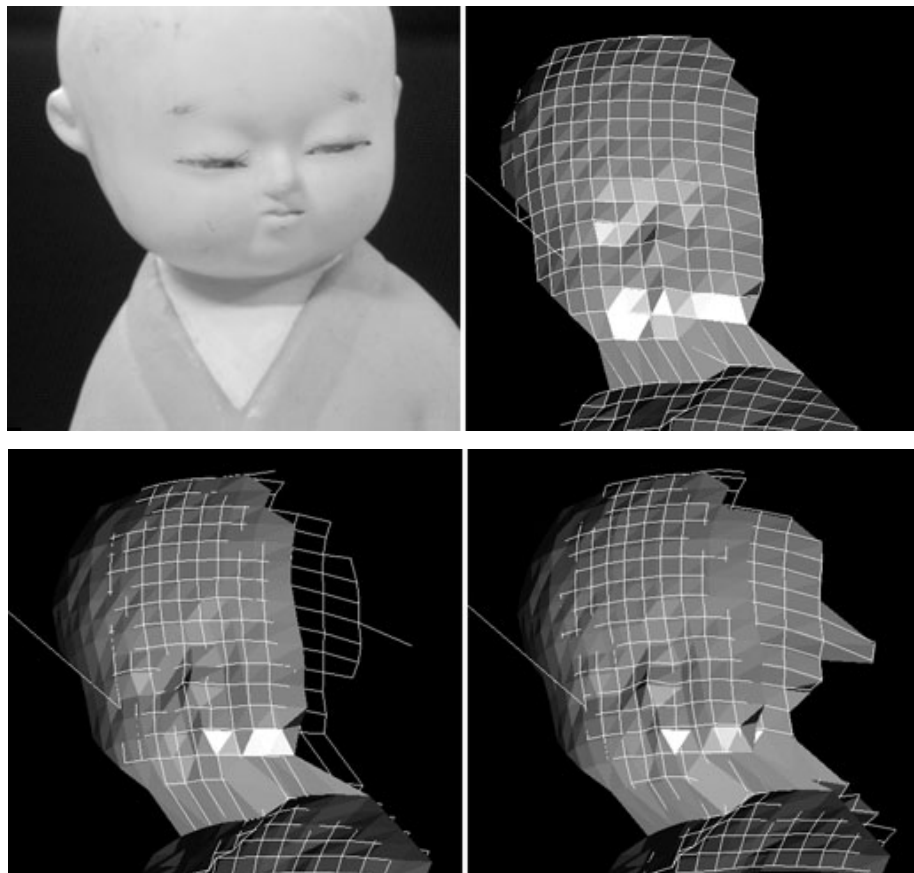


リアルタイム距離画像計測

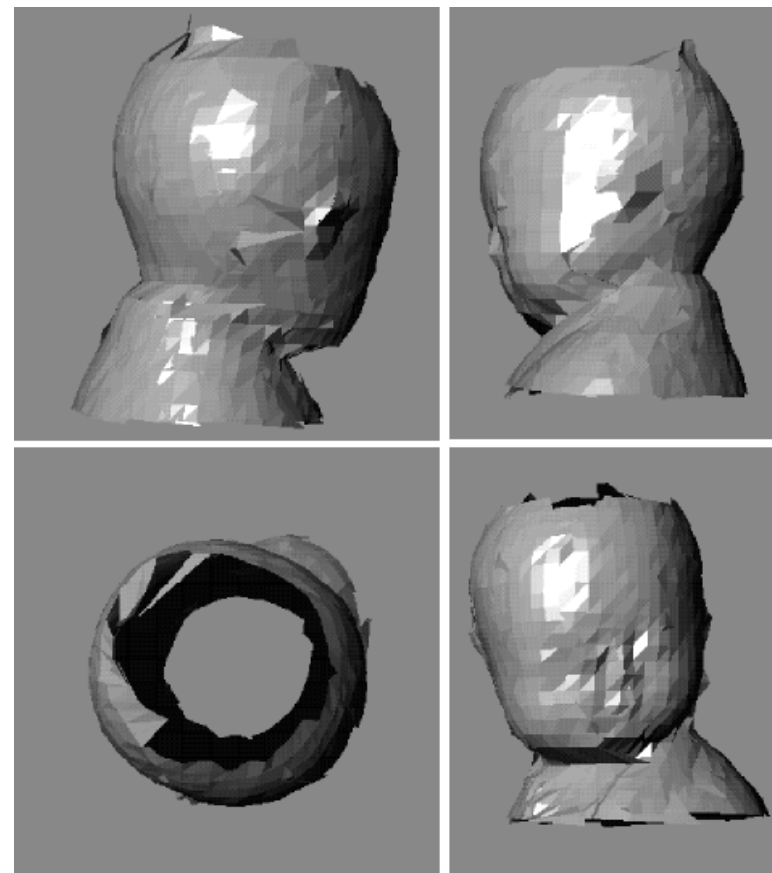


動物体位置・姿勢追跡

距離画像の計測と生成による自由曲面物体の実時間追跡



追跡とモデル拡張の様子



構築された全周形状モデル

日浦慎作, 山口証, 佐藤宏介, 井口征士: 動距離画像の計測と生成による任意形状物体の実時間追跡, 電子情報通信学会論文誌, Vol.J80-D-II, No.6, pp.1539-1546 (Jun. 1997)

LSI の多画素化(1)

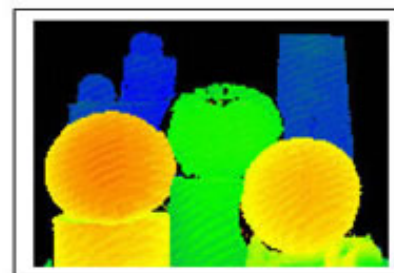
- ソニー Entertainment Vision Sensor
 - (2001)192x124画素
 - (2002)320x240画素
 - カラー画像取得可



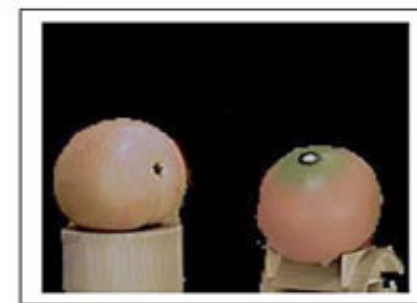
“Entertainment Vision Sensor” チップ写真



カラー画像の例



3次元計測のデータを画像化した例



3次元計測データを用いて
前方物体の画像のみを抽出した例

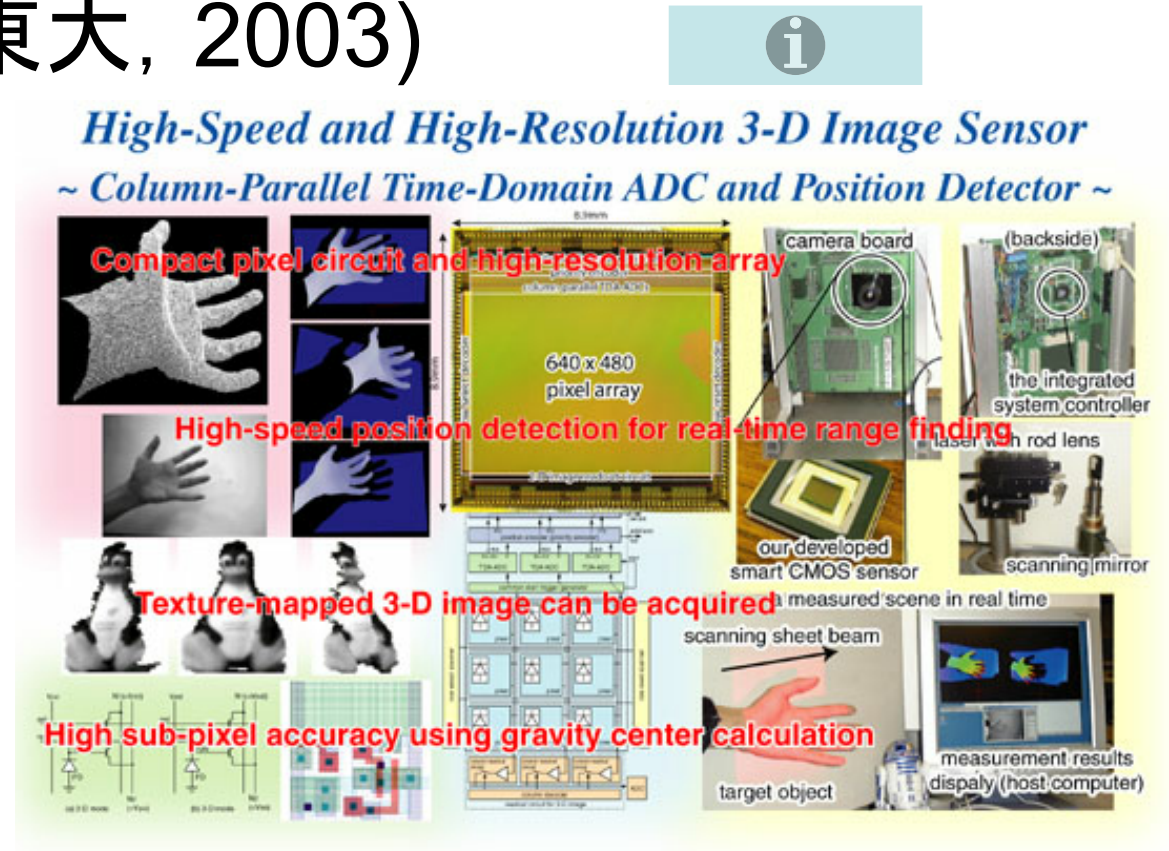
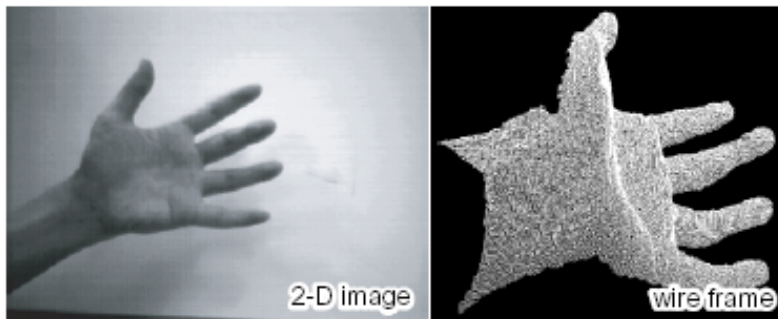
•<http://www.sony.co.jp/SonyInfo/News/Press/200202/02-0207/>

•T. Sugiyama, S. Yoshimura, R. Suzuki and H. Sumi,

"A 1/4-inch QVGA Color Imaging and 3-D Sensing CMOS Sensor with Analog Frame Memory,"
IEEE Int. Solid-State Circuits Conf. Dig. of Tech. Papers, pp. 434-435, 2002.

LSI の多画素化(2)

- 3次元計測センサ(東大, 2003)
 - 640x480画素
 - 多階調処理
 - スリット加重平均

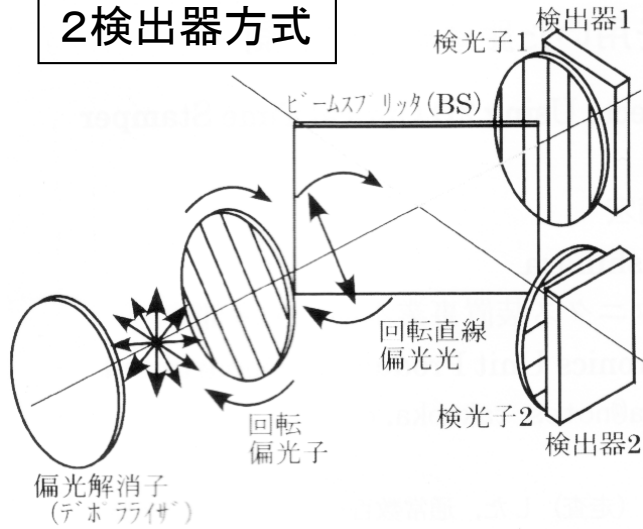


- Y. Oike, M. Ikeda, and K. Asada, "640x480 Real-Time Range Finder Using High-Speed Readout Scheme and Column-Parallel Position Detector," *IEEE Symposium on VLSI Circuits (VLSI Symp.) Dig. of Tech. Papers*, pp.153 - 156, Jun. 2003.

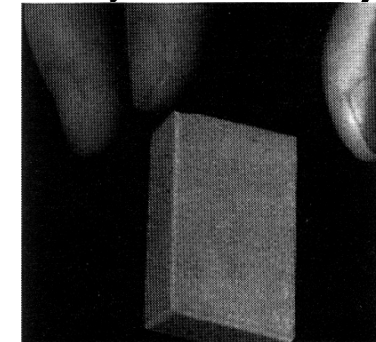
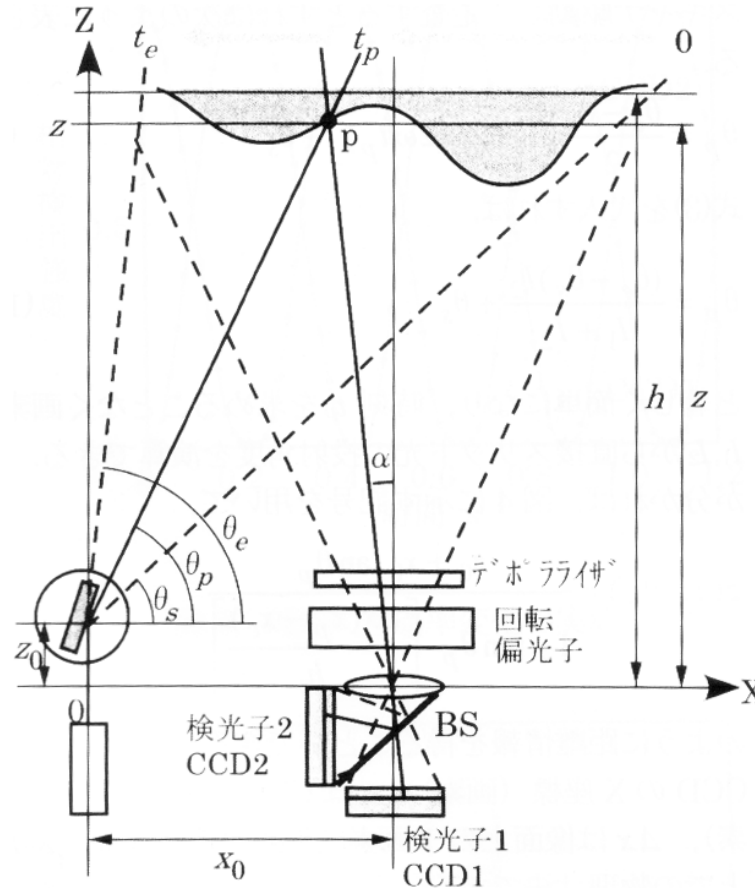
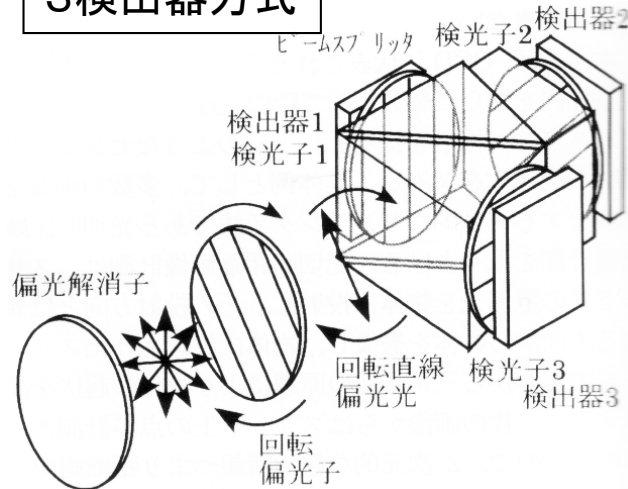
スリット位置を明度に変換する方法(1)

- 2次元光タイムスタンプ(高岳製作所, 2003)

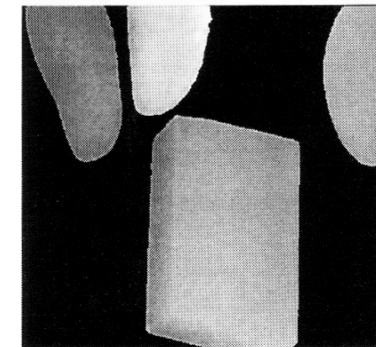
2検出器方式



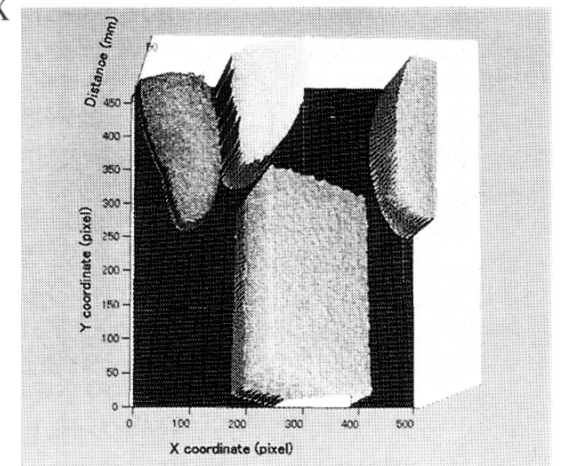
3検出器方式



(a)濃淡画像



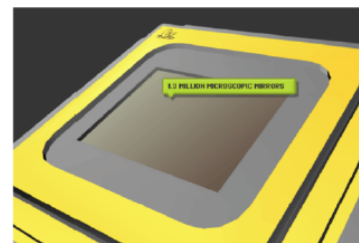
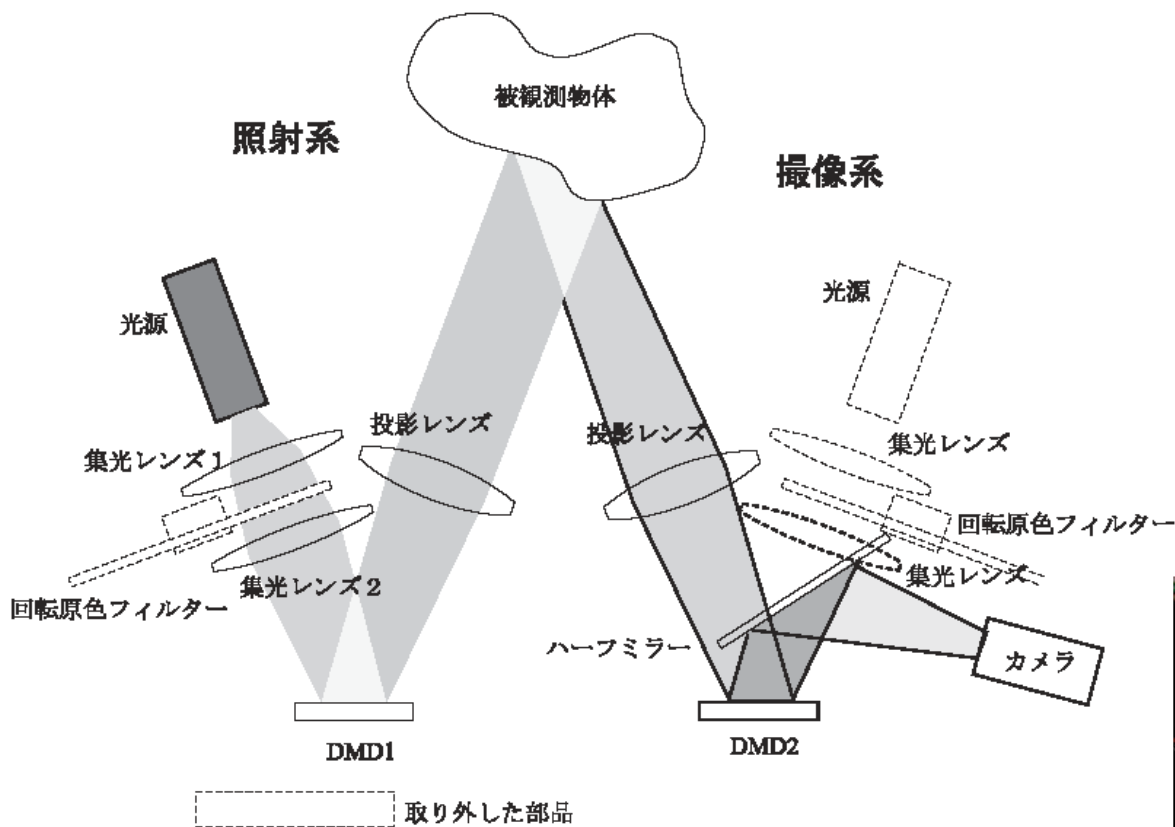
(b)距離画像



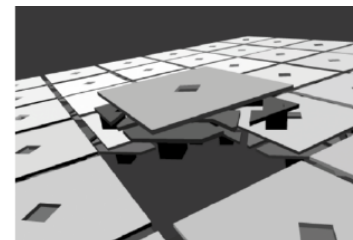
石原満宏,"2次元光タイムスタンプを用いた距離動画像計測",第10回画像センシングシンポジウム講演論文集, pp.501-506, 2004.

スリット位置を明度に変換する方法(2)

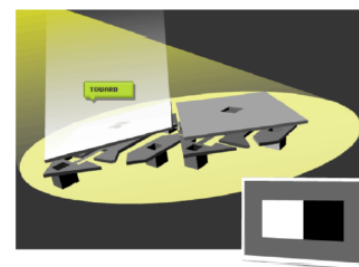
- DMDを光シャッタとして用いる方法



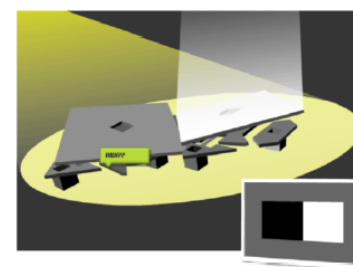
a. DMDチップの外観



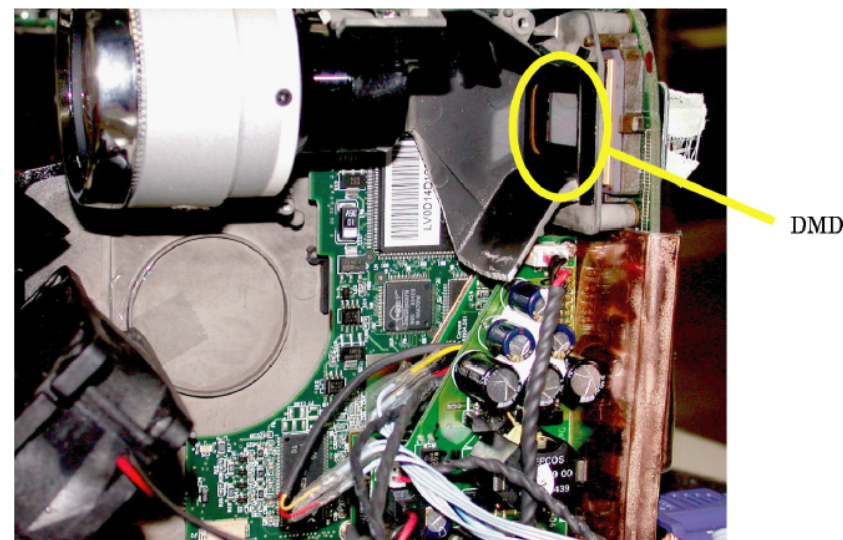
b. DMDの内部構造



c. ミラーの回転によるOn



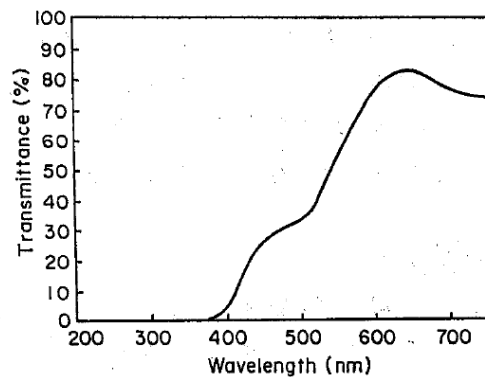
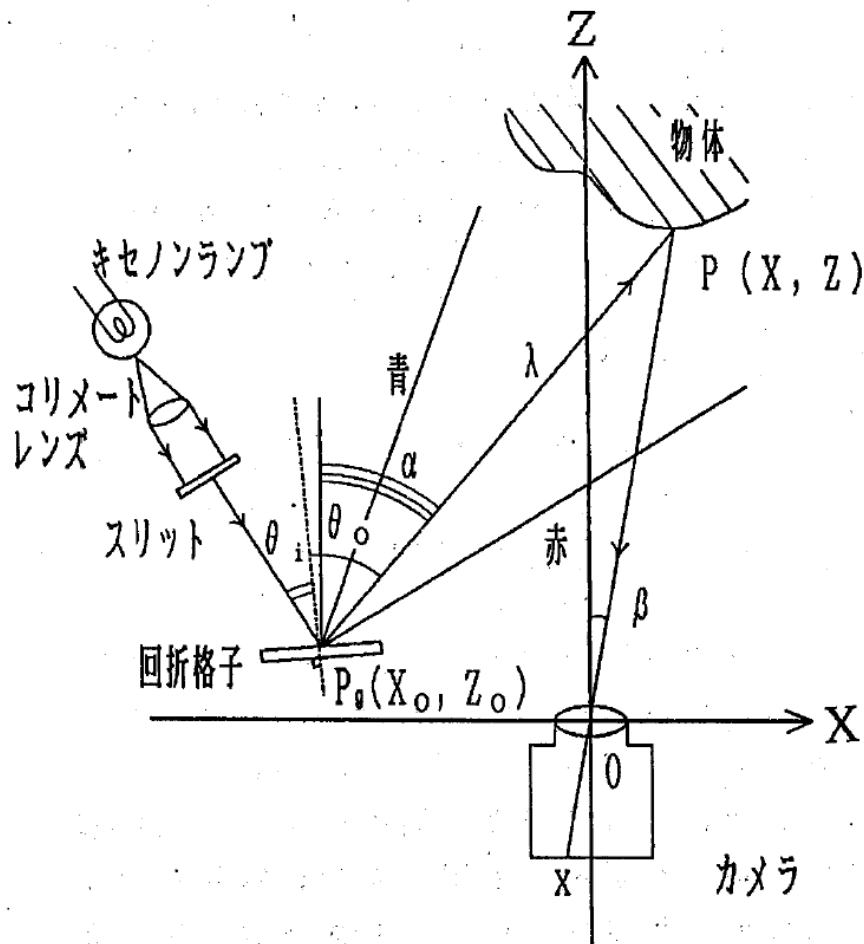
d. ミラーの回転によるOff



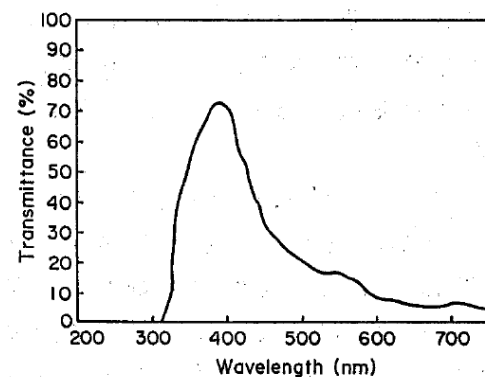
陳謙, 竹下昌宏, 和田俊和, "DMDを用いた実時間レンジファインダの開発", 画像の認識・理解シンポジウム講演論文集, pp.1-733-738, 2004.

スリット位置を明度に変換する方法(3)

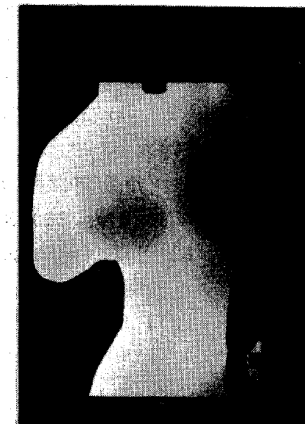
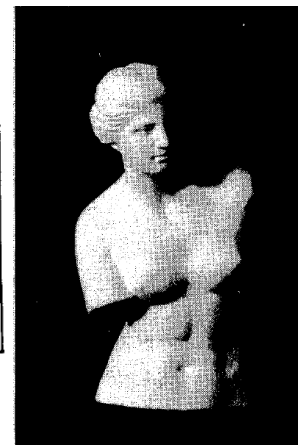
- Rainbow Range Finder (NEC, 1986)



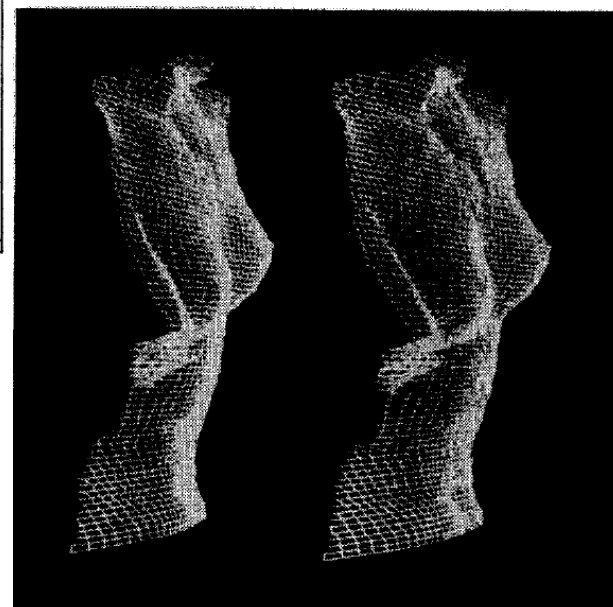
(a) フィルター 1



(b) フィルター 2



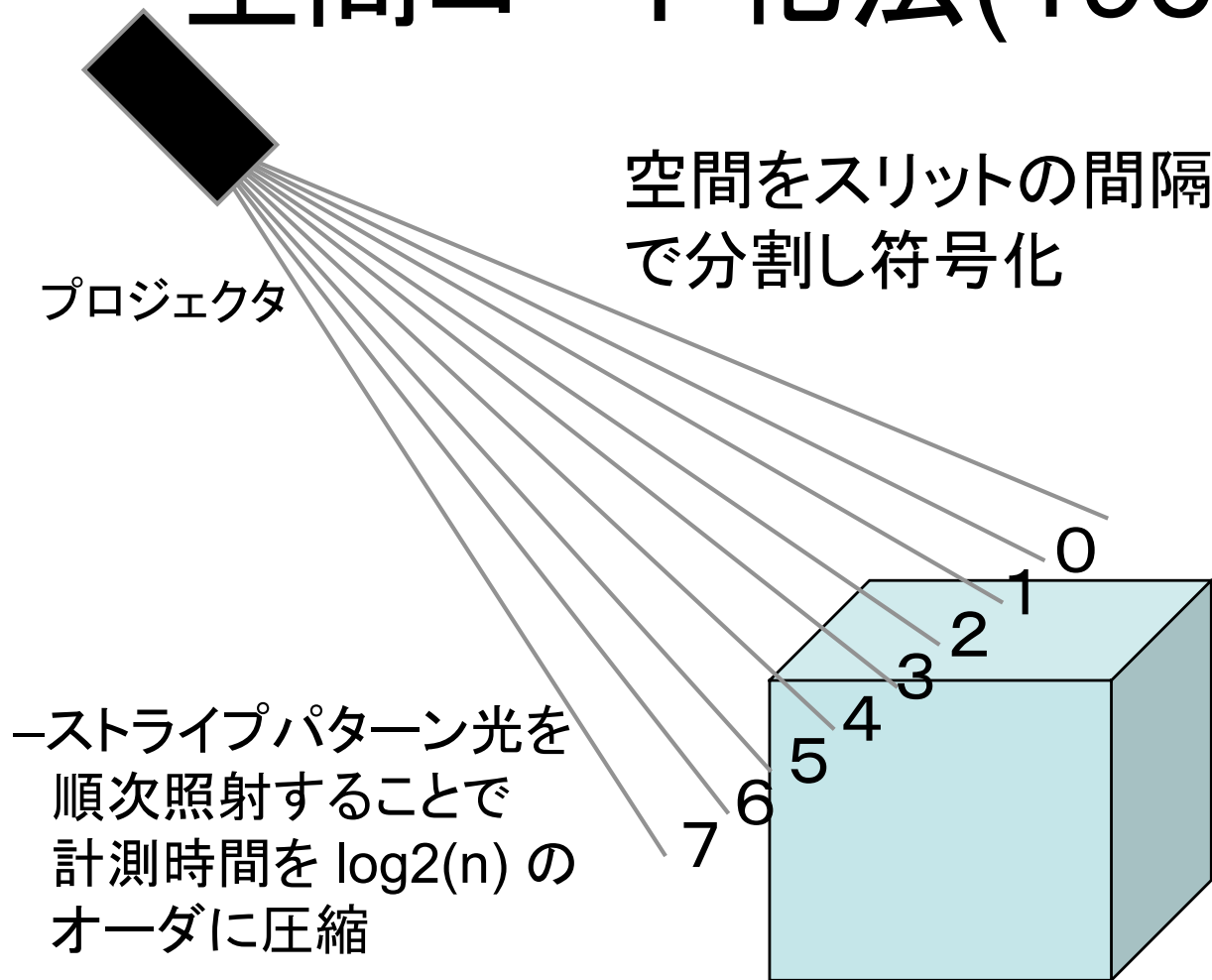
近い 遠い
カメラからの距離



(左目用) (右目用)

- 田島讓二, "Rainbow Range Finderによる距離画像取得", 情処研報CV, No.44, pp.1-7, 1986.
- 岩川正人, 田島讓二, 本山純四郎, "Rainbow Range Finderによる距離計測実験", 情処研報CV, No.59, pp.1-8, 1989.

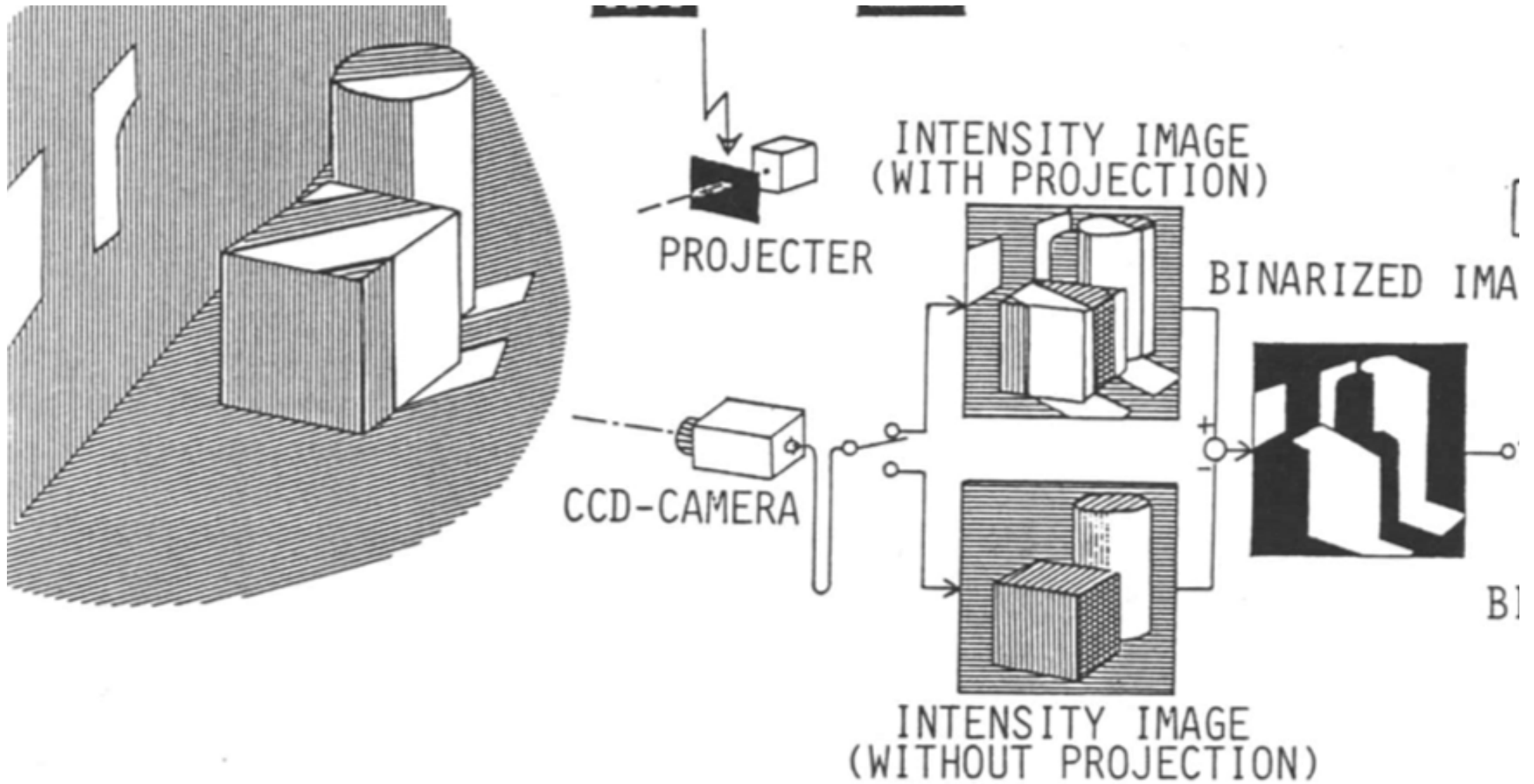
空間コード化法(1985)



- 佐藤宏介, 井口征士, "空間コード化による距離画像入力", 信学論, Vol. J68-D, No. 3, pp. 369-375, 1985.
- 佐藤宏介, 井口征士, "液晶レンジファインダー—液晶シャッタによる高速距離画像計測システム—", 信学論, Vol. J71-D, No. 7, pp. 1249-1257, 1988.

グレイコード				
0	0	0	0	000
1	0	0	1	001
2	0	1	1	011
3	0	1	0	010
4	1	1	0	110
5	1	1	1	111
6	1	0	1	101
7	1	0	0	100
二進コード				
0	0	0	0	000
1	0	0	1	001
2	0	1	0	010
3	0	1	1	011
4	1	0	0	100
5	1	0	1	101
6	1	1	0	110
7	1	1	1	111

光を用いた3次元形状計測

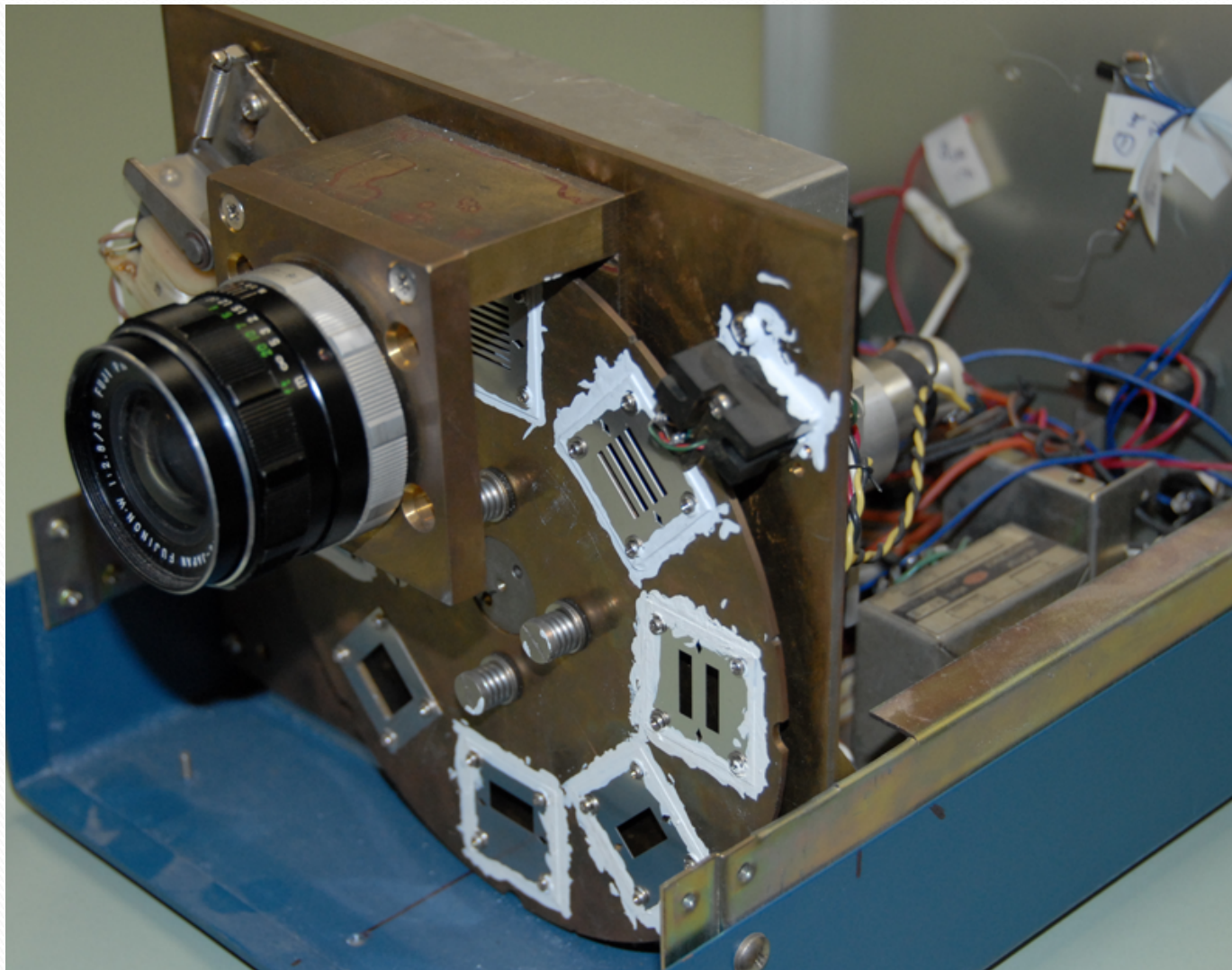


パターン光レンジファインダ



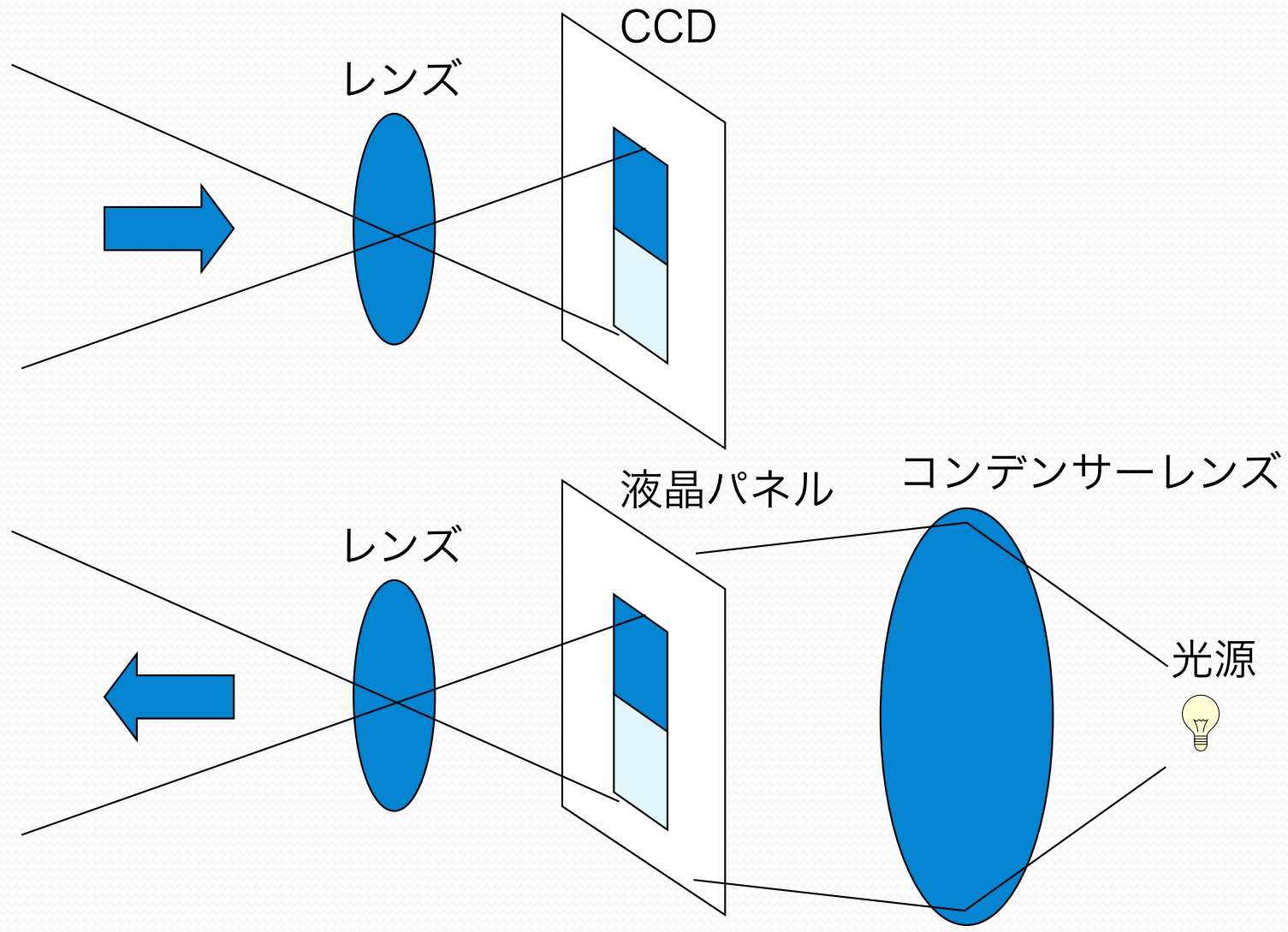
機械式（マスク入れ替え式）のレンジファインダ

機械式プロジェクタ



- 7パターン+照明用パターン（素通し）の8種類のマスクを回転して切り替え

プロジェクタとカメラの構造



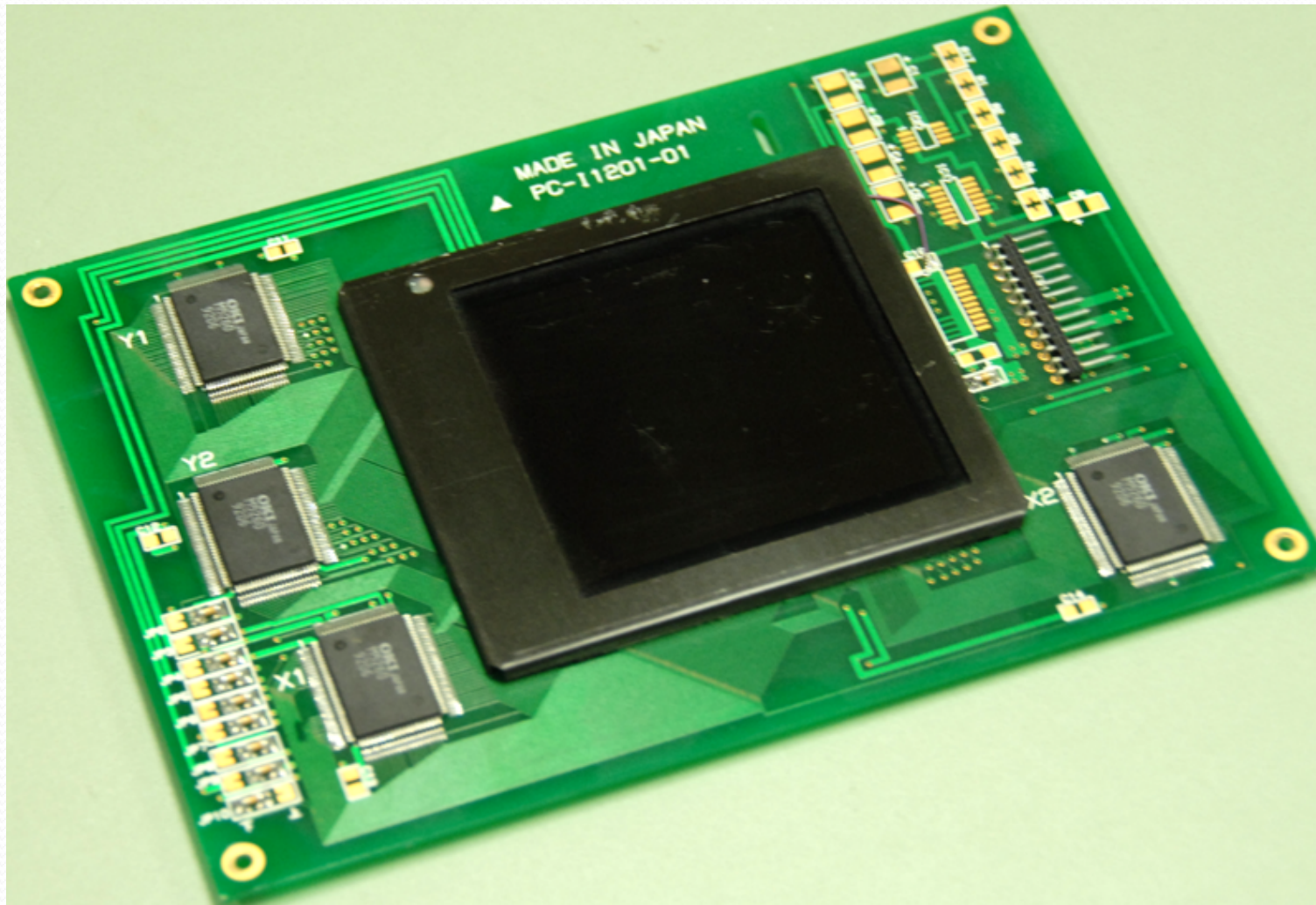
両者の構造は非常に近い

液晶レンジファインダ



- 専用（スリット型）液晶パネルを開発

液晶を用いたプロジェクト



- 初期型：128本のスリット型パターン
- 松下電器産業製

(佐藤)

データプロジェクタの登場

XV-E500
(SHARP, 1995)

入力 : VGA
(640x480)

600 [lm]

14.5 [kg]



XV-H1Z
(SHARP, 1991)

入力 : NTSC
ビデオ信号

(計測には
使用せず)

- 市販品（プロジェクタとカメラ）を用いた形状計測が可能になった
- プロジェクタとカメラの解像度の向上により高精度計測が可能となった

パターン光を用いた動きの計測

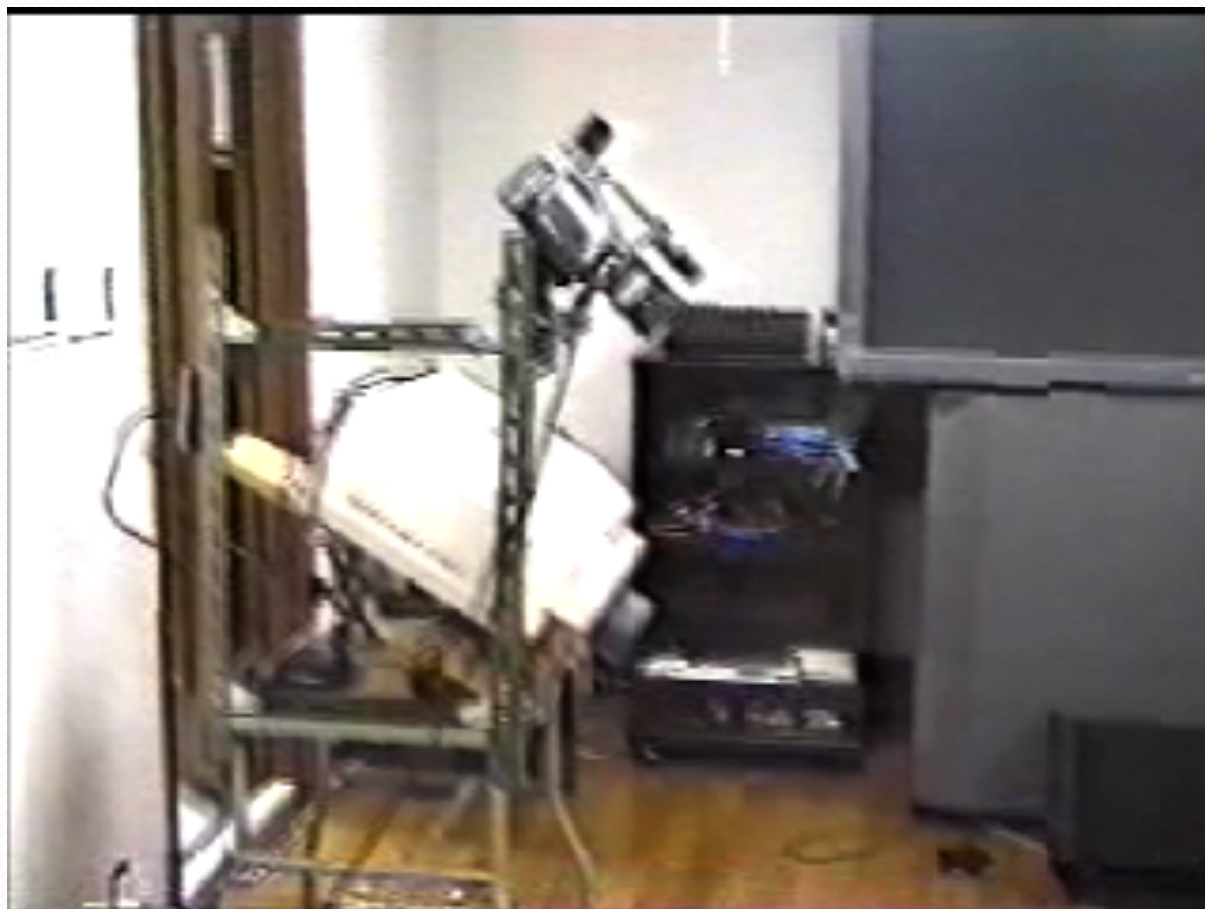


(appeared in 3rd ACCV, 1998)

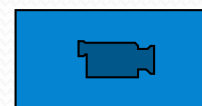
- 追跡戦略（光投影パターン）は物体形状から自動的に生成
- 見え方の変化・遮蔽に対応可能

（三田，日浦）

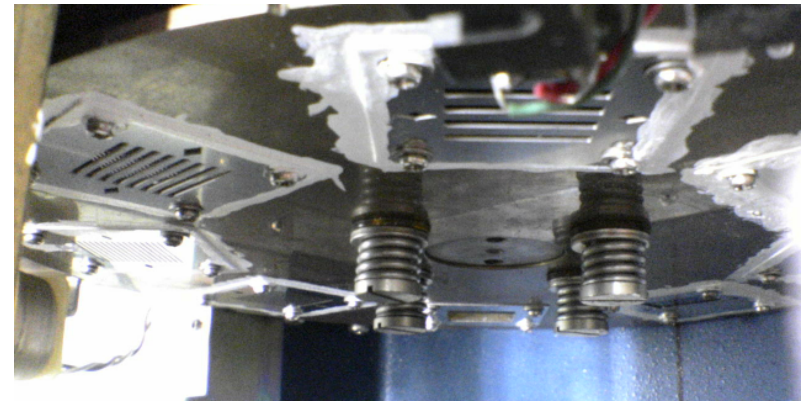
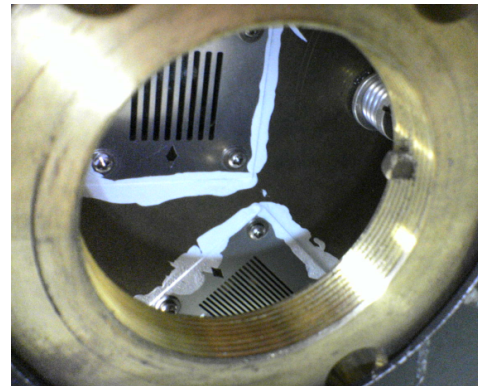
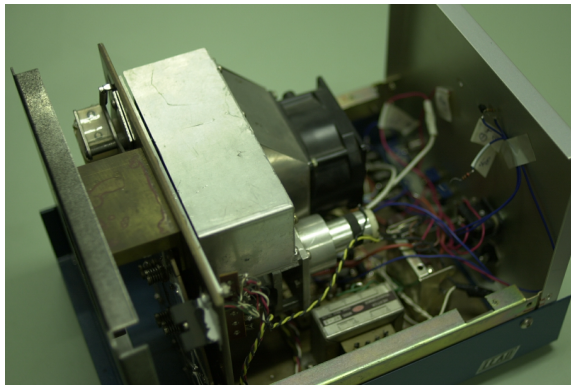
プロジェクトを用いた運動計測



(1996-1997)



空間コード化式レンジファインダ



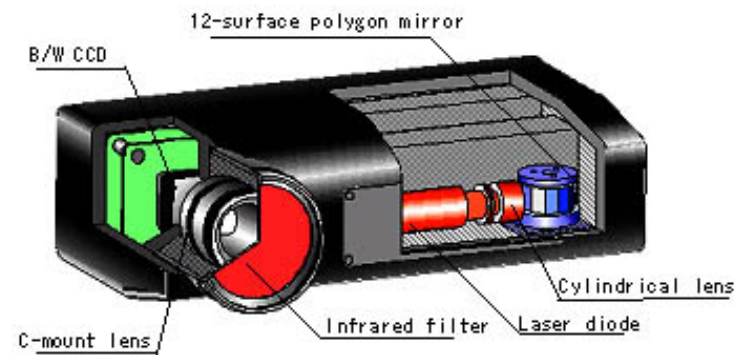
機械式マスク切り替えによる空間コード化法(阪大)



液晶レンジファインダ(阪大/オーグス総研)

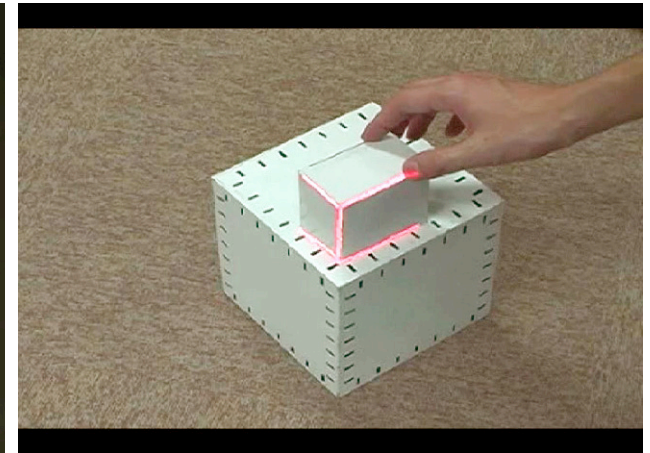
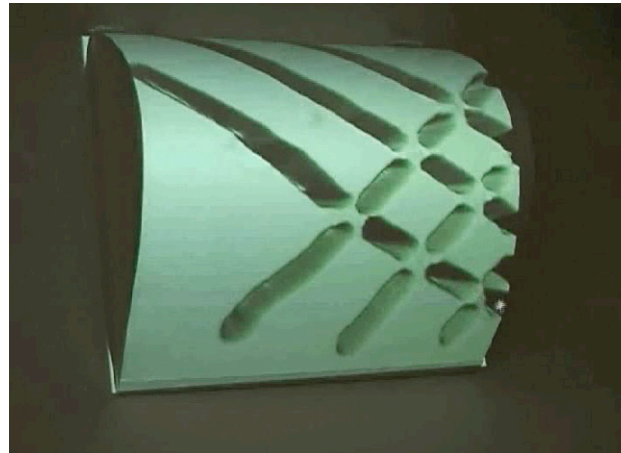
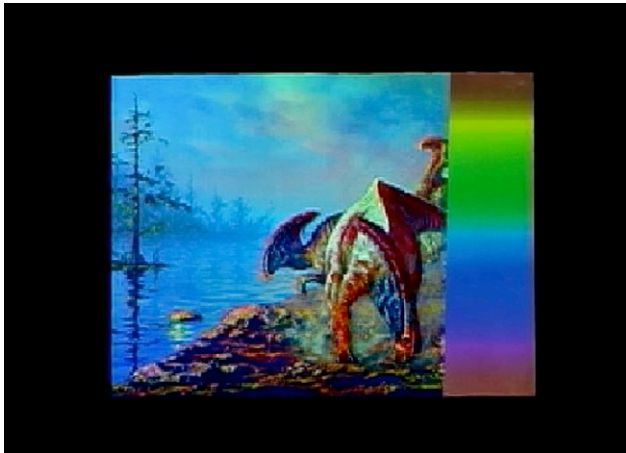
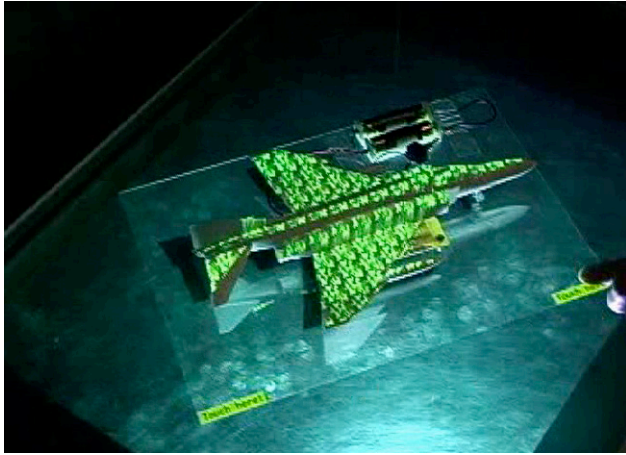


CubicScope (名工大/CKD, 1993)



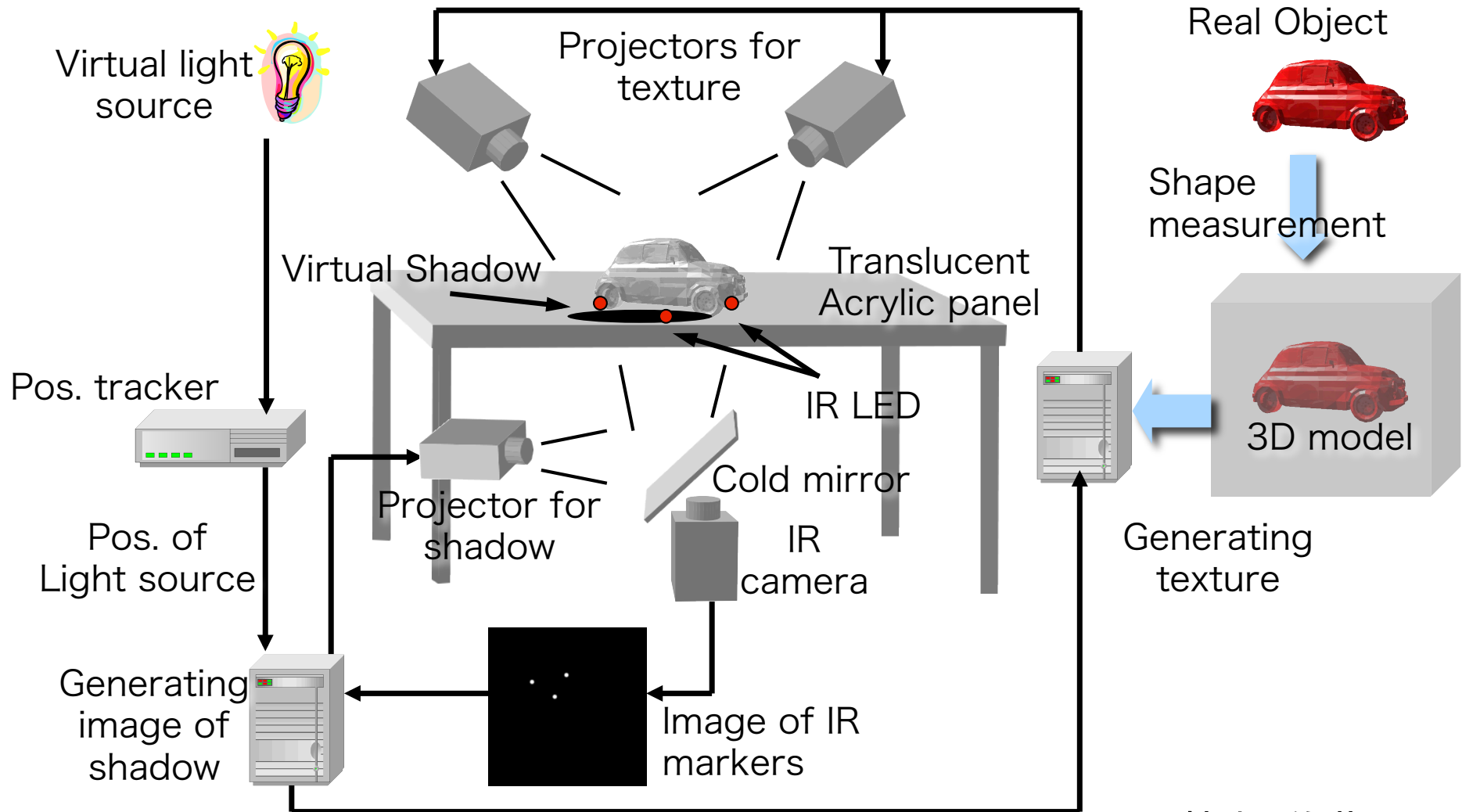
服部 数幸, 佐藤 幸男, "スキャン式符号化法による小型高速レンジファインダ", 信学論 Vol. J-76-D-II, No. 8, pp. 1528-1535, 1993.

Projection-based Mixed Reality

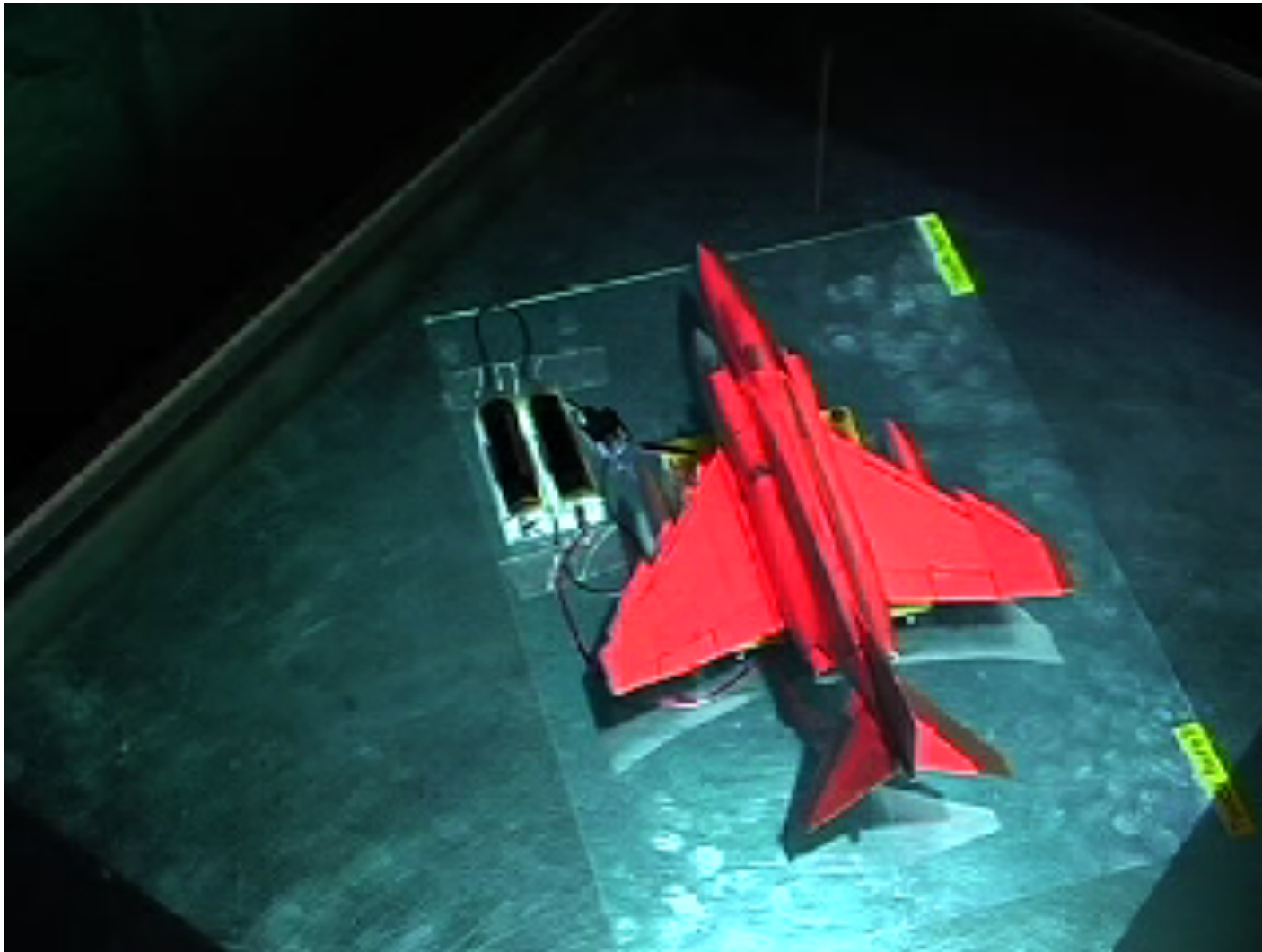


- 実物体の見た目（色，形，光の当たり方，透明感など）を変更出来る

プロジェクタによる仮想照明



仮想照明・テクスチャ付与システム



(2001)

プロジェクタを用いた色の置き換え



VSMM2003

(吉田, 堀井, 佐藤)

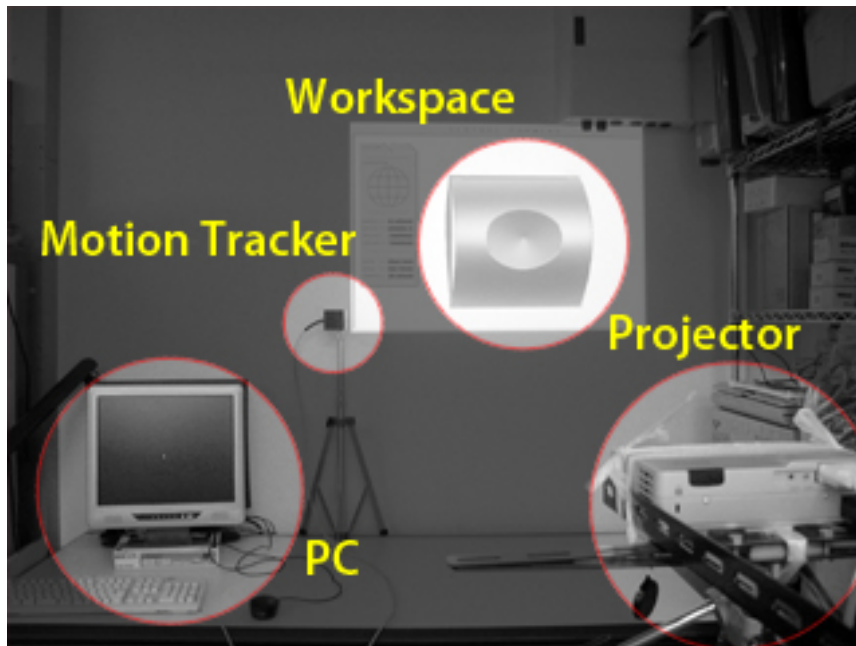
書類透明化システム



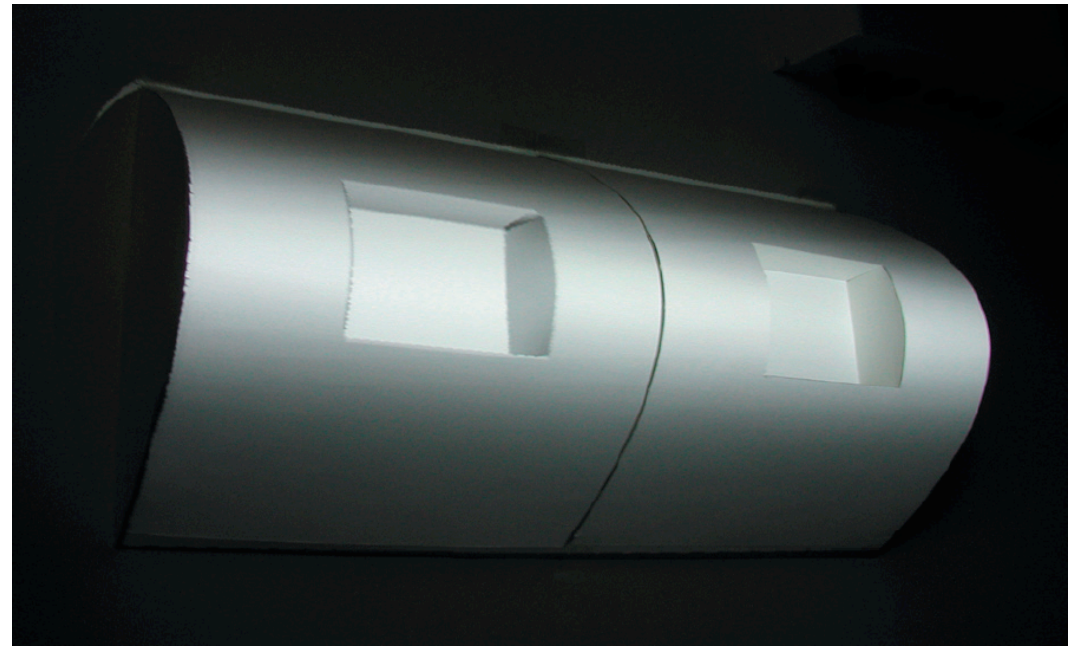
2006.7.11 WBS 「トレンドたまご」

(岩井, 佐藤)

The HYPERREAL : 光学的形状変形



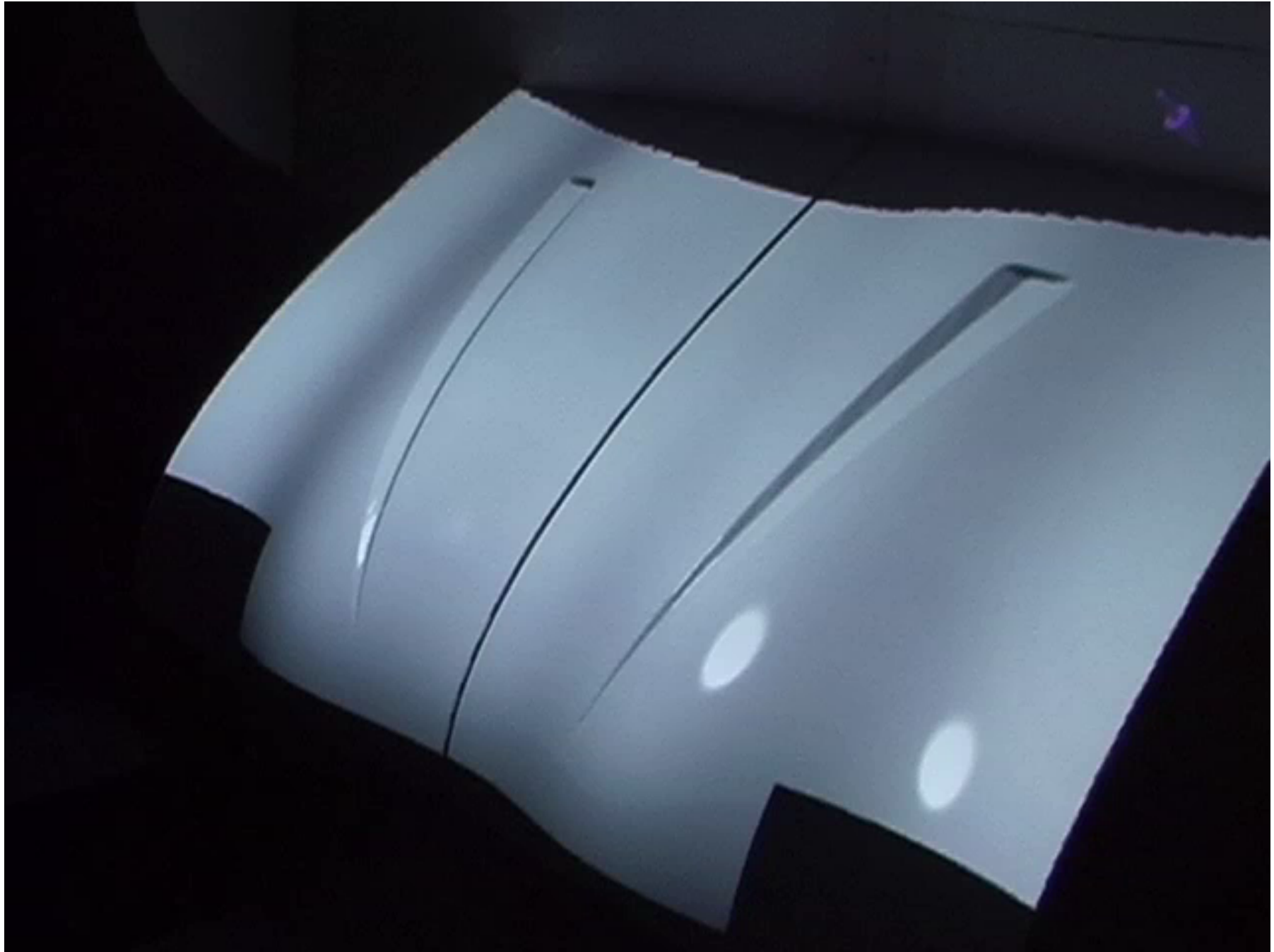
システム構成



光学的変形

実物

- ・頭部位置の計測による画像の補正
- ・形状・照明位置・材質感の仮想的な変更



照明と情報, 文明

- 生物のための光とは
 - 植物：エネルギー源
 - 動物：情報の媒体

ex. 「～に明るい」 = 「～に詳しい」



ラスコー洞窟の壁画

文明の歴史

照明の制御による情報提示

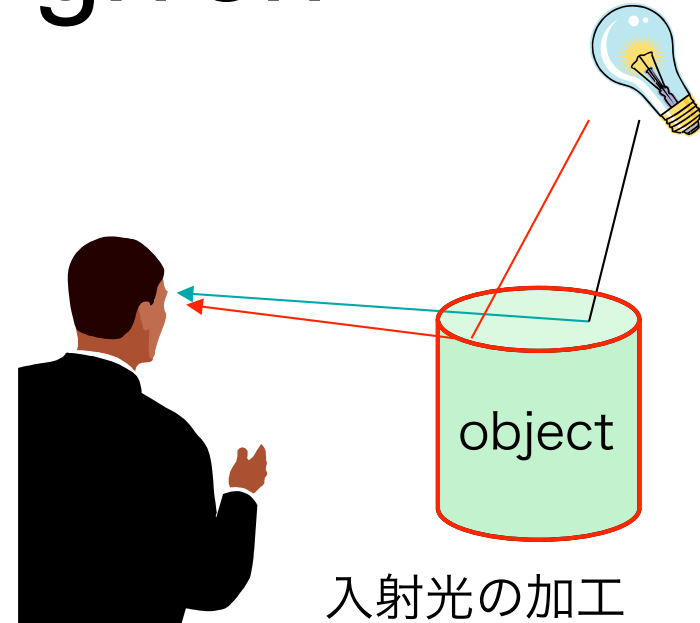
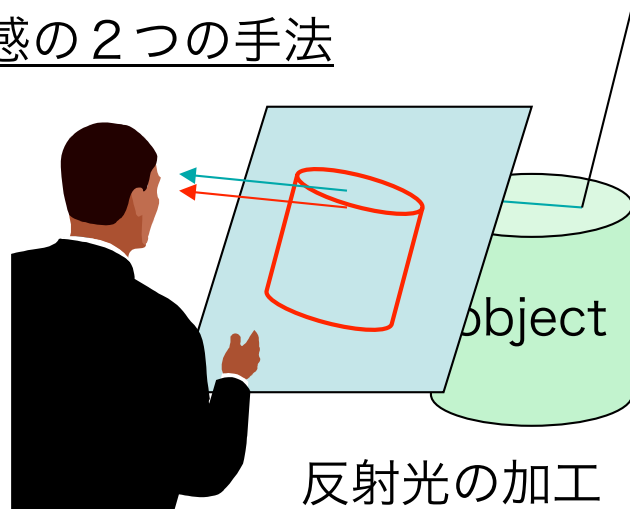
火の利用

現在

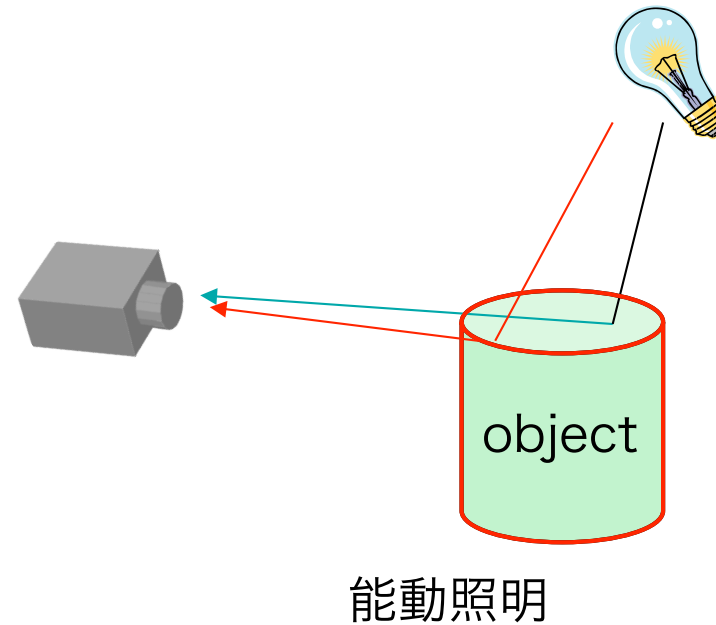
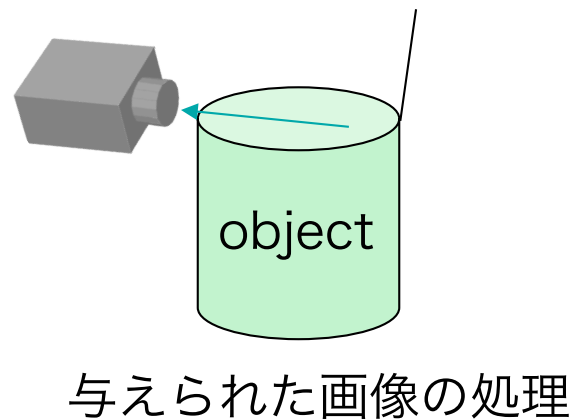
- 「照明」と「情報提示手段」は将来、密に融合されるかもしれない

Vision is not given

拡張現実感の2つの手法

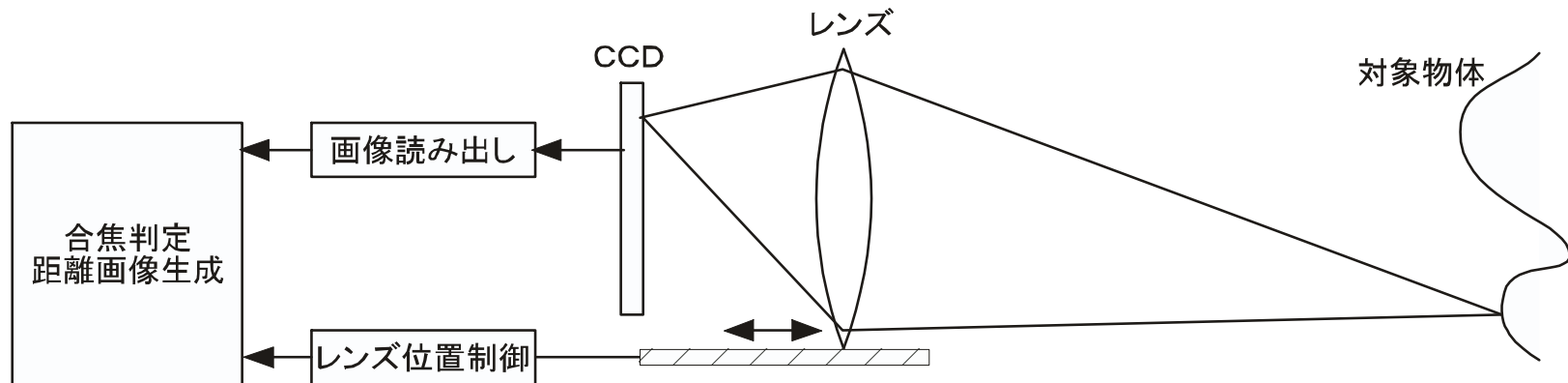


画像処理の2つの手法

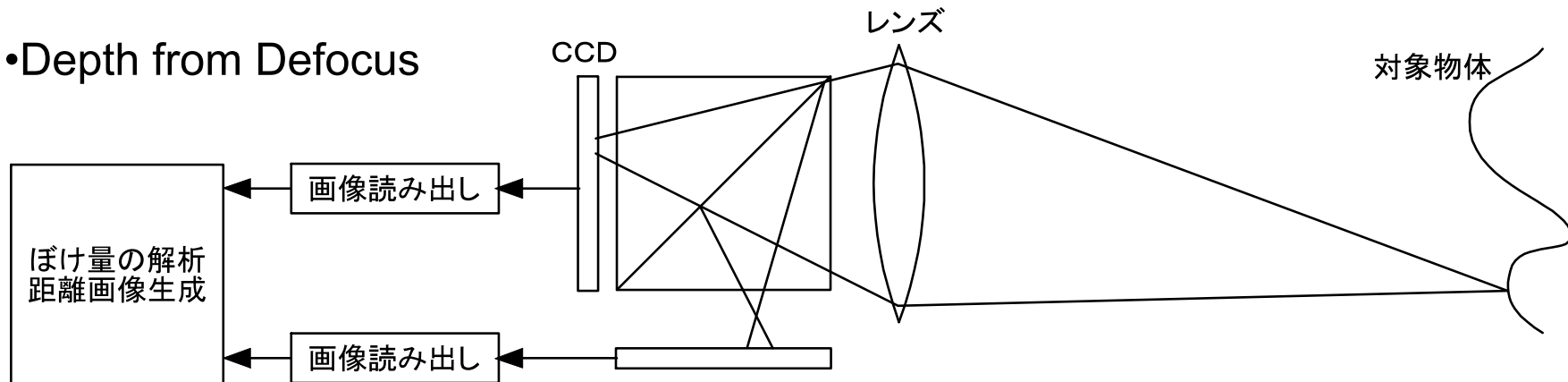


レンズのボケを利用する方法

•Depth from Focusing



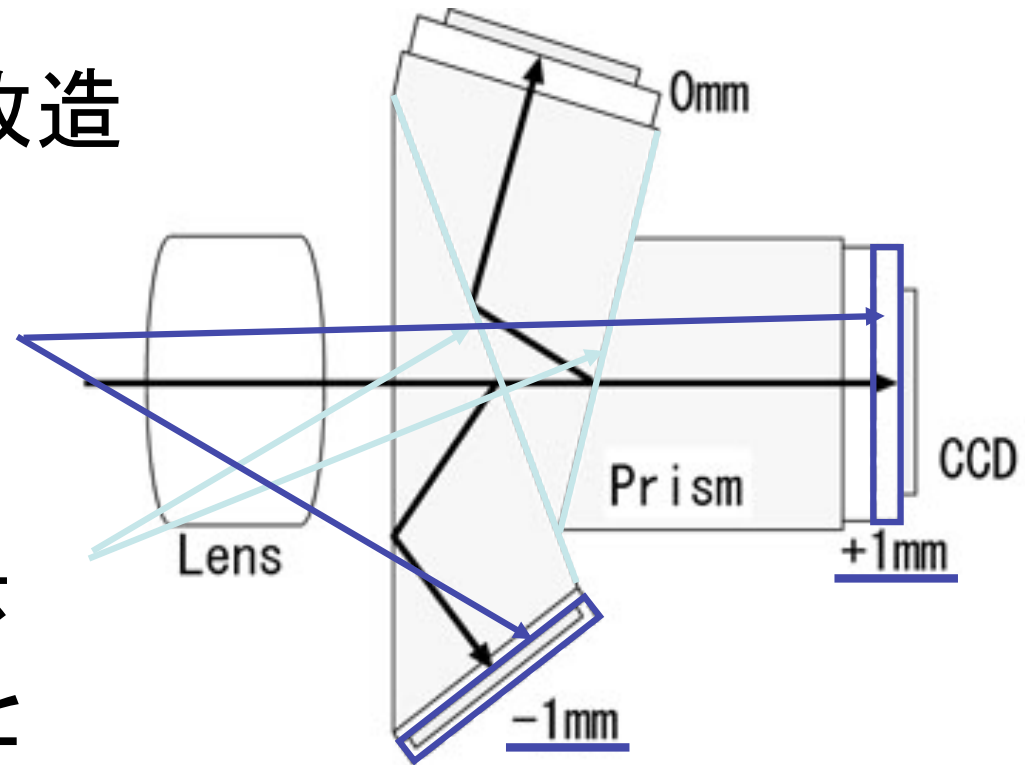
•Depth from Defocus



リアルタイム計測は Depth from Defocus でなければ難しい
(レンズの物理的駆動が必要であるため)

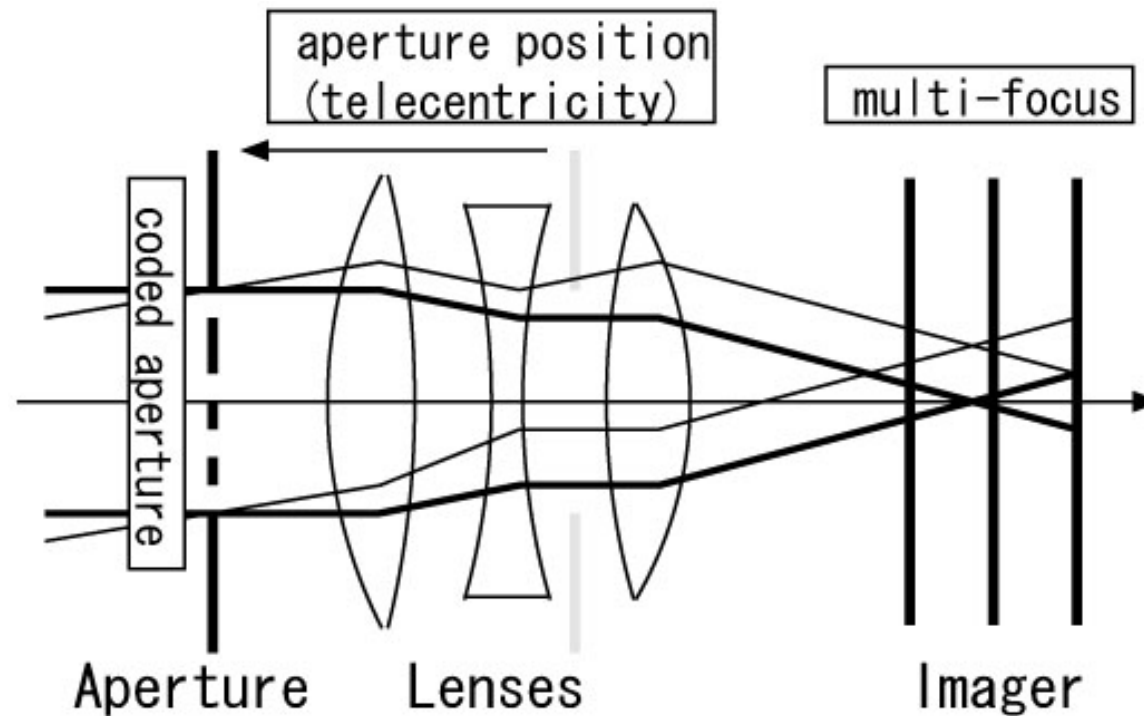
多重フォーカスカメラの構造

- カラーCCDカメラを改造
- 各CCDを1mmずつ光軸方向に移動
- プリズムの再蒸着による分光特性の除去
- 通常の3CCDカメラと同等の寸法／重量



日浦慎作, 松山隆司,
"構造化瞳を持つ多重フォーカス距離画像センサ",
信学論 Vol. J82-D-II, No.11, pp.1912-1920, 1999.

構造化瞳を持つ 多重フォーカスカメラの構成要素



- ぼけカーネルは瞳形状と相似な図形
- カーネルの縮小率は被写体距離に応じて変化

開口形状に求められる性質(2)

- 通常円形開口形状は、高い解像度と広い視野を要求する。



実験：入力画像



最後面CCD

大CCD

前面CCD

実験：復元された完全合焦画像



計測結果：指の動作

Input Image Sequence

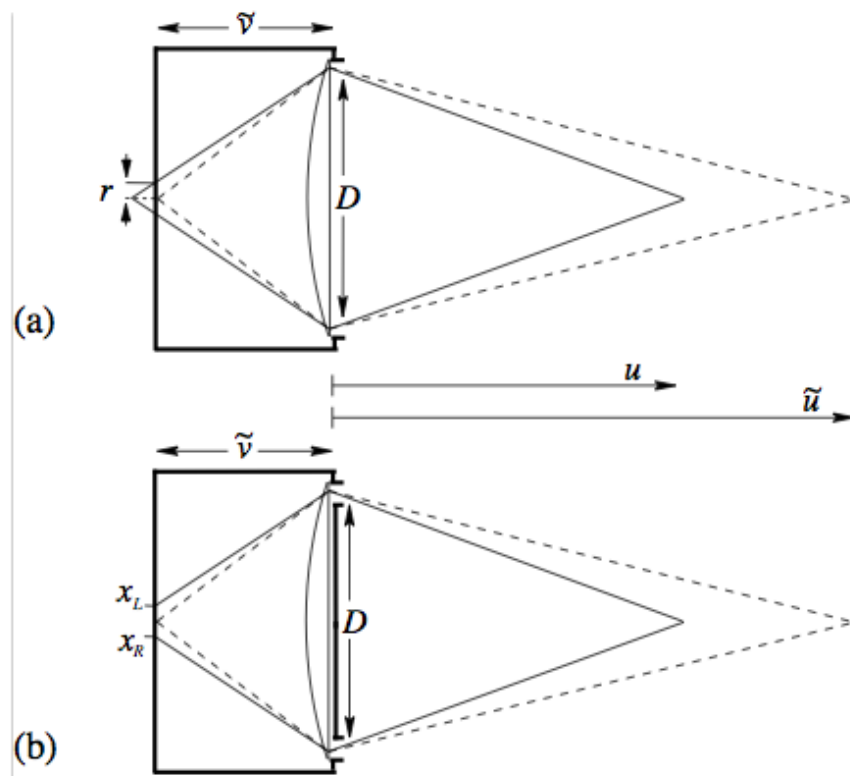


Figure 1. (a) The imaging system is tuned to view in focus object points at distance \tilde{u} . (b) The lens is blocked except for two pinholes on opposite ends of its diameter. The image of a defocused object point is two points.

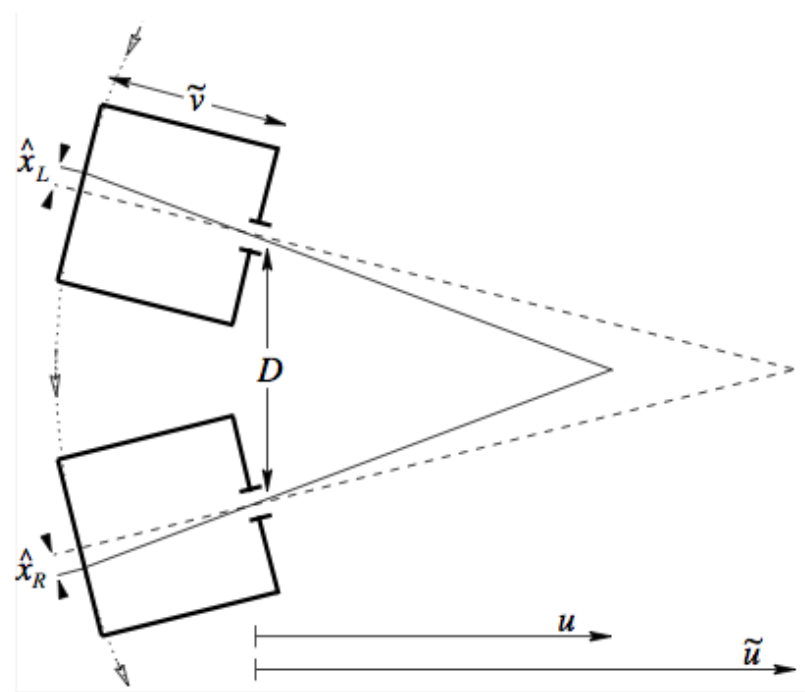
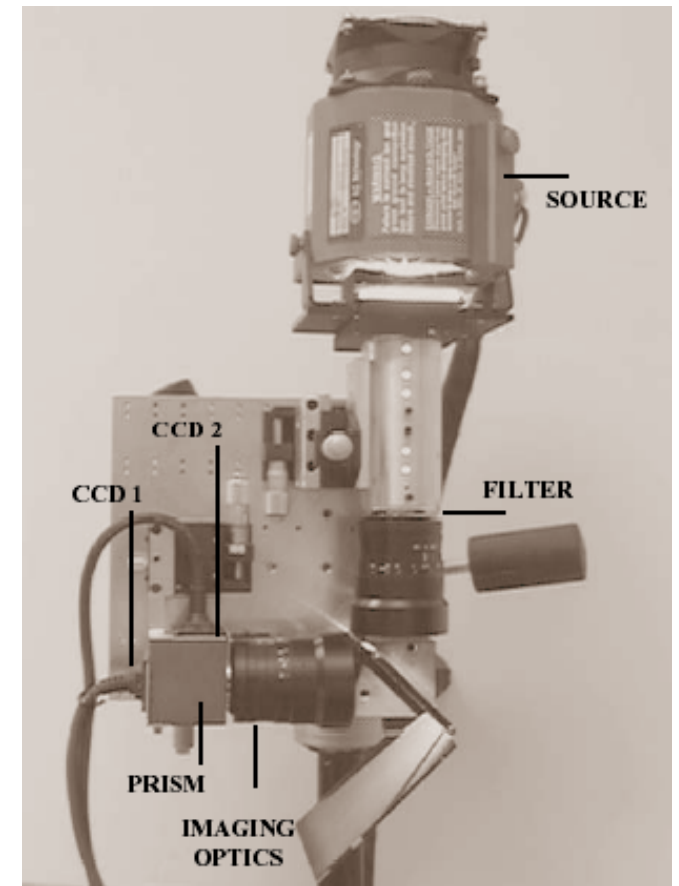
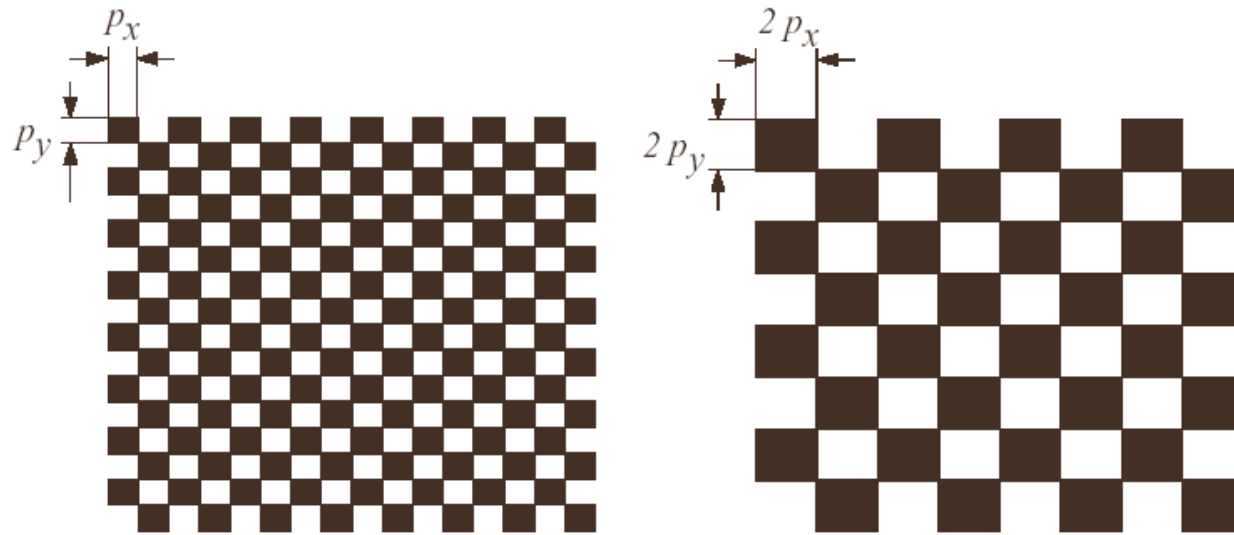


Figure 2. A stereo system with a baseline D equal to the lens diameter in Fig. 1, and distance \tilde{v} from the entrance pupil to the sensor that is also the same. Motion along the arc is analogous to defocus blur.

Real-Time Active Defocus Range Sensor



- パターン光 (画素に位置合わせされたチェッカーボード状の光) を照射
- 共焦点顕微鏡に近い原理

Real-Time Focus Range Sensor,"

S. K. Nayar, M. Watanabe, and M. Noguchi,

Technical Report CUCS-028-95, November 1994.



光を利用した距離計測の原理

- **三角測量**に基づく方法

- 受動型 / 能動型 ステレオ法
- Depth from Focusing / Defocus
- モアレトポグラフィ

- 受動的計測が可能
- 遠距離ほど精度が低下

- **光速**を利用する方法

- 光飛行時間測定法
- 強度変調光位相差測定法
- 干渉計

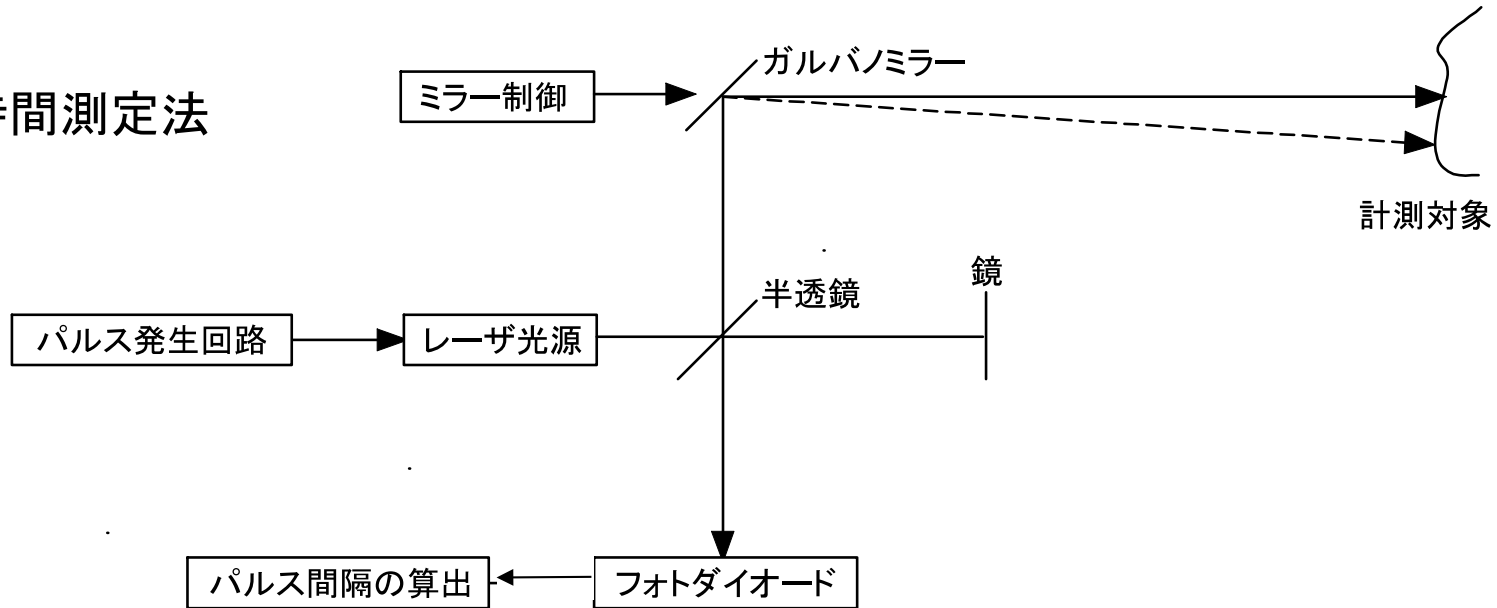
- 距離による精度低下が小さい
- 近距離の測定(高時間分解能が必要)は難しい

- **その他**

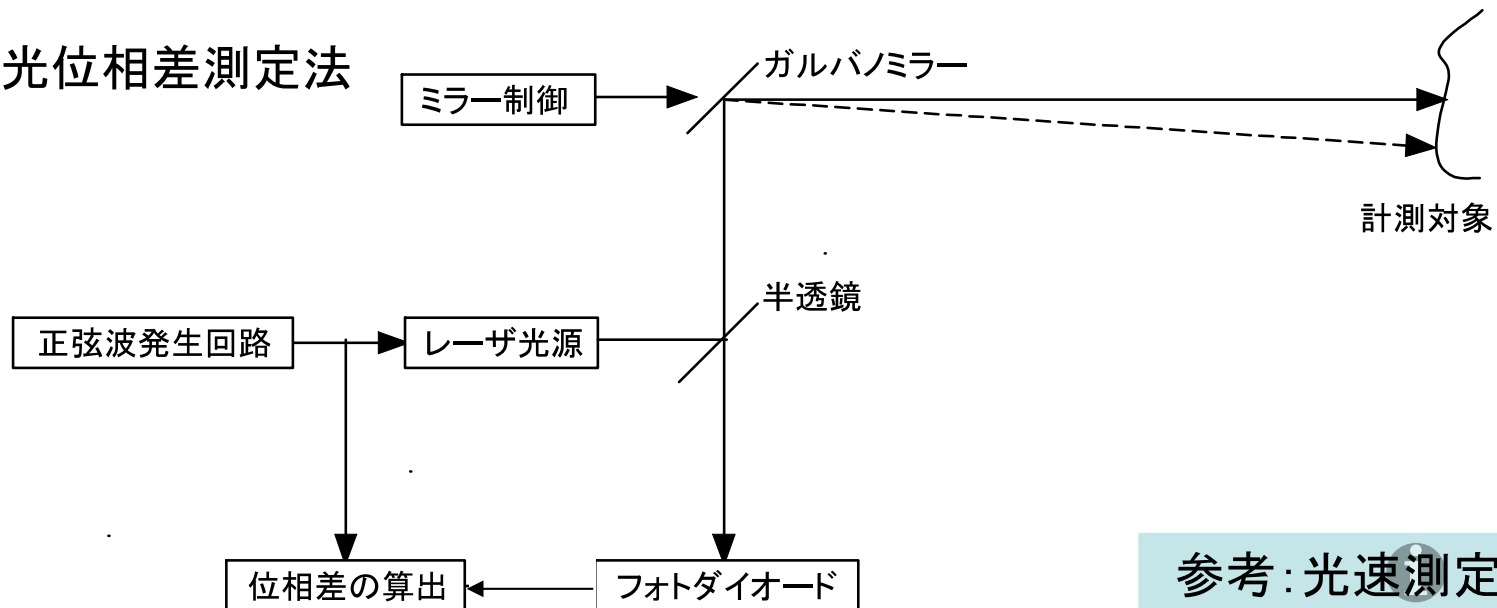
- 距離と照度の関係を利用する方法
- shape from X (shading, texture, motion, etc.)

光速を利用した距離測定法

・光飛行時間測定法



・強度変調光位相差測定法



光飛行時間測定法に基づく レンジファインダ

- 遠距離物体の計測に向けた手法
(近距離物体の計測は不得意)
- デバイス技術の進展により, 非常に高速
かつ高精度な機器が出現してきた

– Riegl



– Cyrax



– K2T

– Z+F

– Sick

などが市販されている



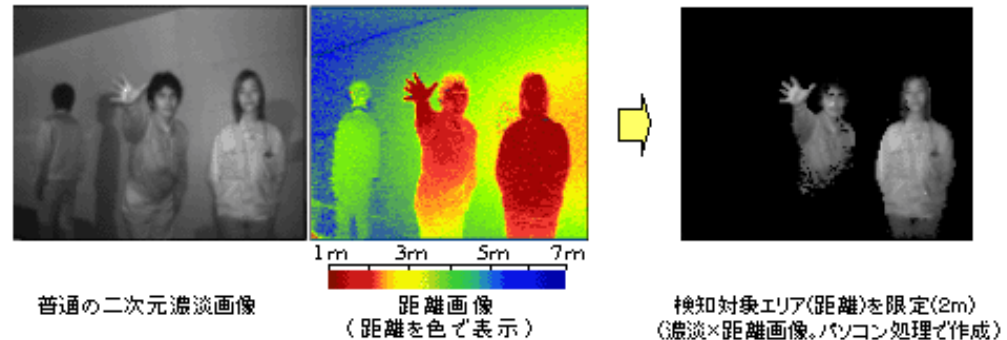
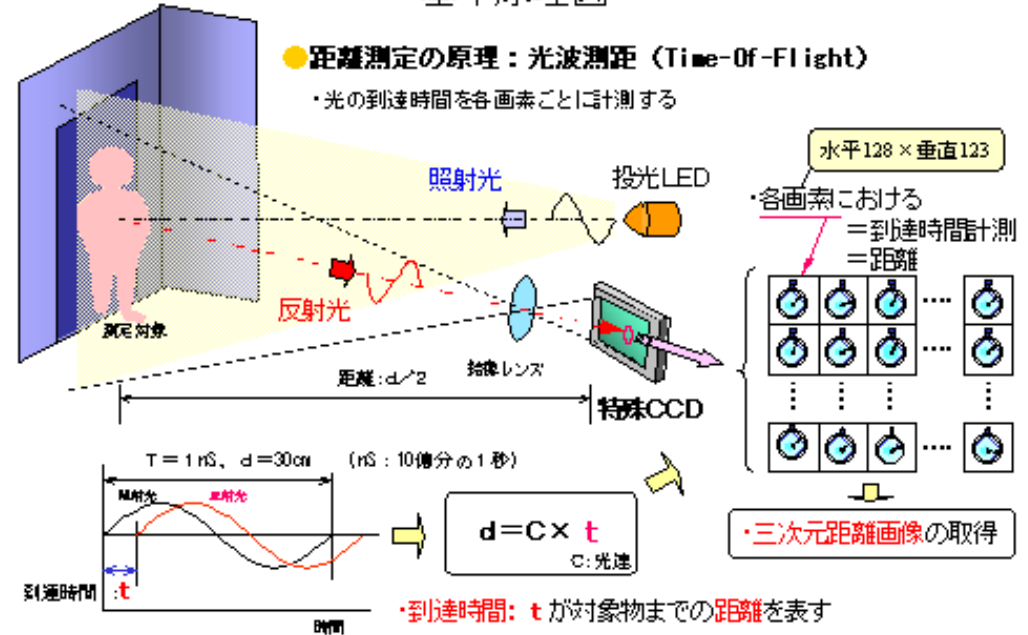
位相差測定法のLSI化(1)

- 松下電工(2004)
 - CCD方式
 - 光源は赤外LED
 - 128x123画素
 - 15frames/sec

各画素で得られた光電子を発光周期に合わせ、それぞれ別のウェルへ誘導・蓄積しているものと推定される



基本原理図

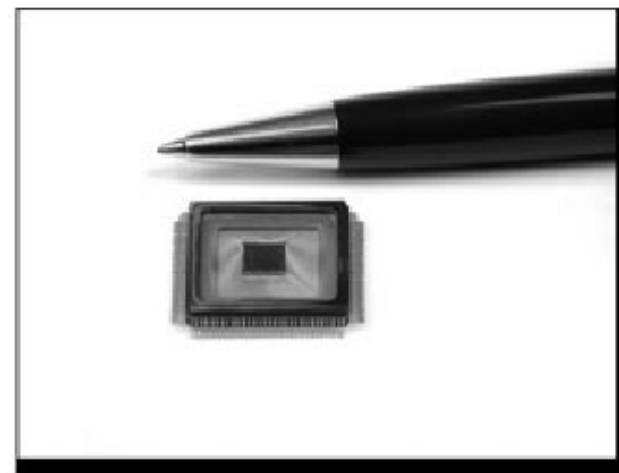


位相差測定法のLSI化(2)

- Canesta Equinox(2004)
 - CMOS方式
 - 光源は赤外LED
またはレーザー
 - 64x64画素
30frames/sec
 - 開発ツール提供中



第11図 開発ツール DP-200



第5図 “1チップ3次元画像センサー
‘EQUINOX’

その後の発展

- ステレオ法
 - 商品増えるが、本質的な進化はほとんどなし.
- 光飛行時間測定法
 - 小型・安価の機器(北陽電機など)が普及.
 - 2次元タイプも多くなった.
 - MESA Swisstranger, Canesta 等が熱心
 - Project Natal by Microsoft. まもなく商品化か.

スキャナ式レンジセンサ (測域センサ)

●データ出力タイプ

URG-04LX-UG01 [レーザ式測域センサ]

【通称：Simple-URG】USBバスパワーによる簡単接続、しかも低価格なので初めてお使いになる学生の教材などに最適です。自律移動型サービスロボットの障害物回避や人検知に使用可能です。測距精度を要求する研究用途にはClassic-URGをお使いください。



UTM-30LX [レーザ式測域センサ]

【通称：Top-URG】30m、270°の広範囲スキャンを実現。太陽光10万lxで、保護構造もIP64なので、屋外で稼動するサービスロボットに利用できます。スキャン時間25msなので、ロボットの高速走行に効果的です。DC12V。



UBG-04LX-F01 [レーザ式測域センサ]

【通称：Rapid-URG】スキャン時間28msの高速測距を実現しました。高速で移動するサービスロボットの障害物回避や経路計画に最適です。測距範囲は4m、240°です。DC12V。



URG-04LX [レーザ式測域センサ]

【通称：Classic-URG】量産化された世界最小クラスの測域センサです。自律移動型サービスロボットの周辺環境認識と自己位置推定に最適です。小型軽量、低消費電力ながら、測距範囲は4m、240°です。DC5V。



●エリア設定タイプ

UXM-30LN [レーザ式測域センサ]

受光感度をアップさせ、さらに長距離検出が可能になりました。また、苦手な黒色検出性能も大幅に改善しました。



UTM-30LN [二次元反射形侵入検知センサ]

30m、270°の長距離検出を実現。太陽光10万lxで、保護構造もIP64なので、屋外監視にも利用できます。60msの高速応答で、はみ出し検知などにも最適です。DC12V。

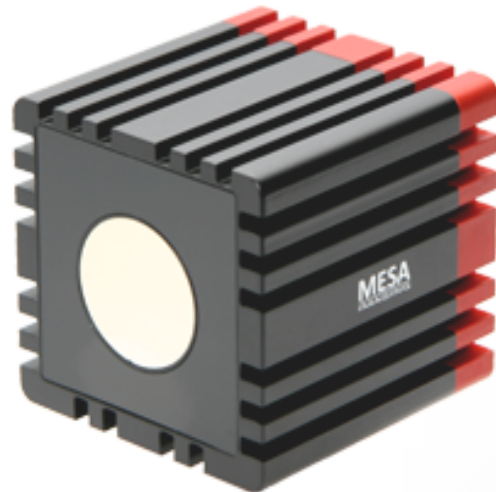




Welcome to MESA Imaging - The leading provider of 3D Time of Flight cameras.

The use of digital imaging continues across all aspects of our commercial and personal lives. An important transition to use of 3D data sets is now underway. As the leader in the development and commercialization of time-of-flight range imaging, MESA Imaging is delivering products that readily provide 3D depth maps through its award-winning technology.

The SR4000 represents the 4th generation of time-of-flight cameras designed by MESA, and provides stable distance information in a robust, reliable hardware package. Incorporating the proprietary Silo pixel architecture, the SR4000 sensor chip offers unique distance measurement capabilities.





SEE HOW CANESTA'S SOLUTION
GESTURE CONTROL
WILL CHANGE THE LIVING ROOM

LEARN MORE

NEWS

- [A Start-Up Has Survived to Beam Up Your Gestures](#) [03/28/10]
- [frog design Showcases Canesta Technology at SXSW Interactive Event](#) [03/15/10]



We Are Hiring!

Join Our Team!

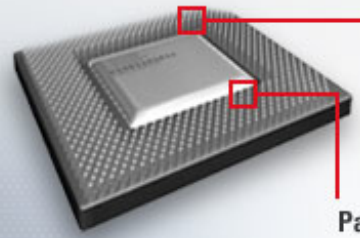
CUSTOMER PRAISE

"We believe that it is only a matter of time until gestural interfaces are found in virtually every living room."


Hiroyuki Mizukami,
HITACHI

[read more](#)

TECHNOLOGY



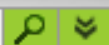
CanestaVision™ Chips
Single, Low-Cost CMOS Chip
[read more](#)



Patented Electronic Perception Technology
CanestaVision is a low cost electronic perception technology which enables machines and devices to recognize and locate objects in three dimensions in real time, enabling them to "see."
[read more](#)



Search Xbox.com



Join Xbox LIVE - Free



My Xbox



Xbox 360

Games

Accessories

Xbox LIVE

Community

Support

PROJECT NATAL

Introducing Controller-Free Gaming & Entertainment





Infinite new ideas and applications

[Find more about our technology](#)[PrimeSense and Xbox](#)[Living room](#)[Gaming](#)[Consumer](#)[Solution](#)

PrimeSense at a glance:

Best Technology

PrimeSense's technology empowers consumer electronic devices, such as TVs, set-top boxes, living-room PCs and more with natural interaction capabilities. | [>>](#)

Reference Design

PrimeSense's Vision



Watch PrimeSense's unique living room

PrimeSense and Xbox 360

PrimeSense™ supplies 3D-sensing technology to 'Project Natal' for Xbox 360

Ground-Breaking Optical Sensing and Recognition Technologies to Aid Gesture Control Platform. [Read more!](#)