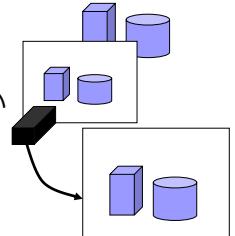


## 3次元計測は難しい

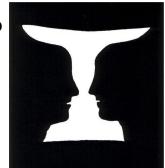
- 画像は奥行き情報を（はっきりとは）含まない
  - 実物を撮影しているのか？

□ 「実物の写真」を撮影しているのか？  
区別できない



- 知識によって見え方が変わる
  - 「思い込み」によって見まちがえることも。

□ 「思い込み」によって見まちがえることも。

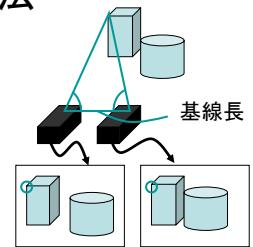


## 今回の内容

- 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（次回から）
  - 3次元空間と2次元画像の関係
  - カメラの式表現
  - カメラの各パラメータの推定（キャリブレーション）

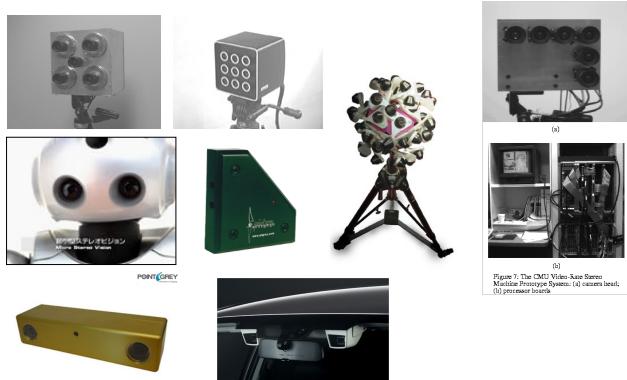
## ステレオ法

- 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

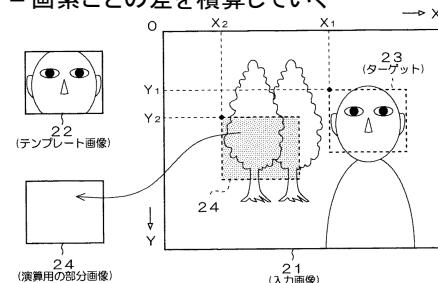
## 様々なステレオカメラ



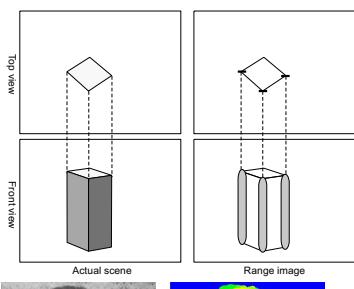
## 探索の手法

- テンプレートマッチング

– 画素ごとの差を積算していく



## 受動型ステレオ法の問題点



### 対応付け問題

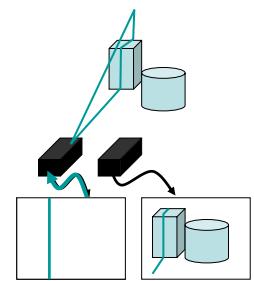
- 右画像と左画像の対応する点を見つけるのが難しい、不安定
- 解像度が下がる

## 能動型ステレオ法

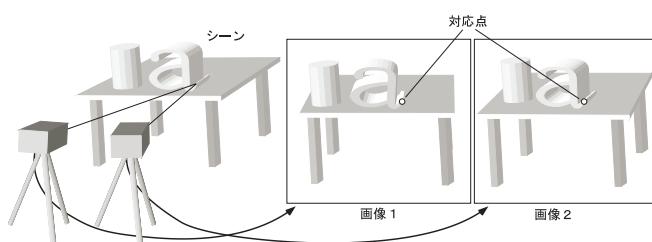
- 一方のカメラをプロジェクタに置き換える(光を投影)

- 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

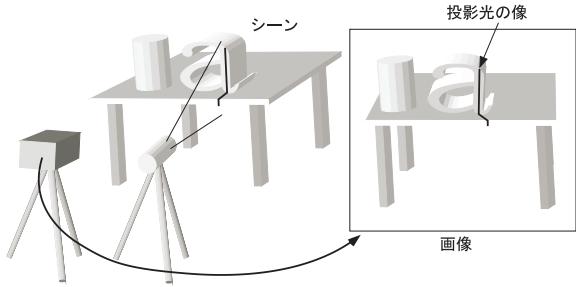


## スポット光投影法



- 1点を2次元的に走査する必要があり、計測に時間がかかりすぎる

## スリット光投影法



- 走査の必要はあるが、計測精度が高く、広く用いられている
- 光切断法とも呼ぶ

## 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

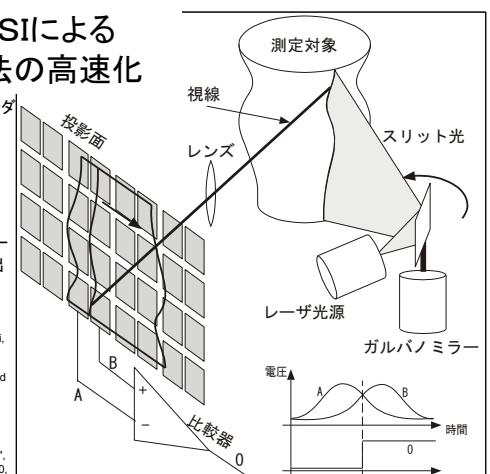
## 専用LSIによる光切断法の高速化

シリコンレンジファインダ  
(1994, 阪大/ソニー)

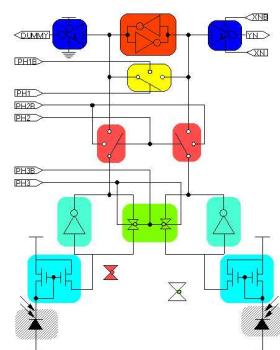
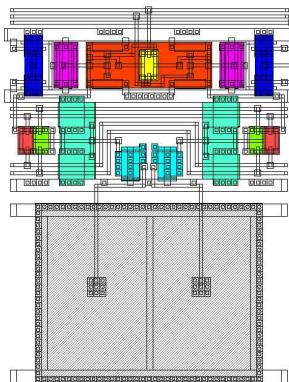
- 特徴:
  - 24×24画素
  - デジタル的
  - スリットのピーケン通過を検出可能

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.

横山幹、佐藤宏介、芦ヶ原勝之、  
井口信士、「無調整型二値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ー」、  
信学論D-II, No.9, pp.1942-1950,  
1994。



## シリコンレンジファインダの フロアレイアウト



## 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

i



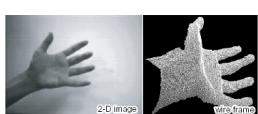
\*Entertainment Vision Sensor\* デップ写真

<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)

i



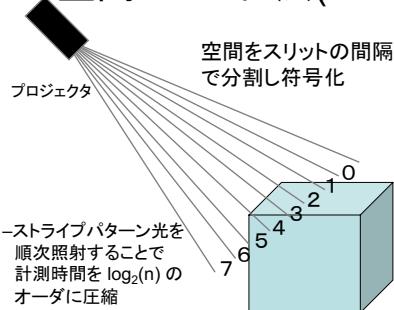
• Y. Oike, M. Ikeda, and K. Asada, "640x480 Real-Time Range Finder Using High-Speed Readout Scheme and Column-Parallel Position Detector,"  
 IEEE Symposium on VLSI Circuits (VLSI Symp.) Dig. of Tech. Papers, pp.153 - 156, Jun. 2003.

## コード化パターン光投影法



- 投光装置が複雑になるが、計測時間がスリット光投影法よりも短い

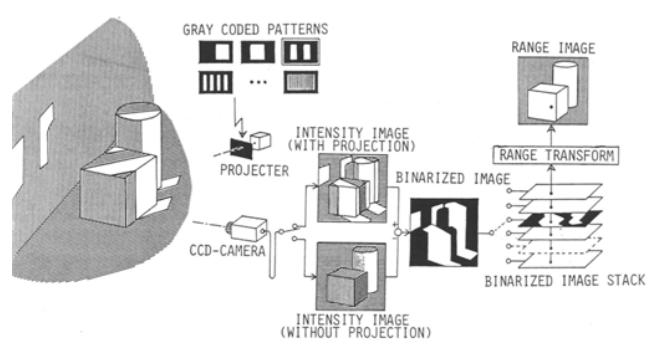
## 空間コード化法(1985)



• 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  
 一液晶シャッタによる高速距離画像計測システムー",  
 信学論, Vol. J71-D, No. 7, pp. 1249-1257, 1988.

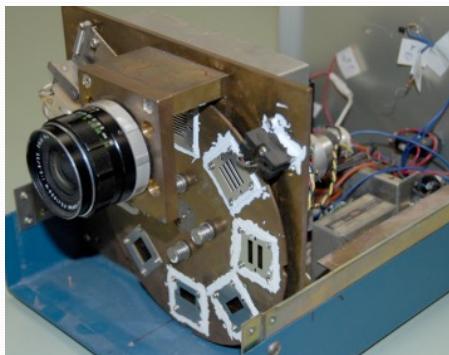
ゲヨド	
0	0
1	0
2	0
3	0
4	1
5	1
6	1
7	1
進ヨド	
0	0
1	0
2	0
3	0
4	1
5	1
6	1
7	1

## 光を用いた3次元形状計測



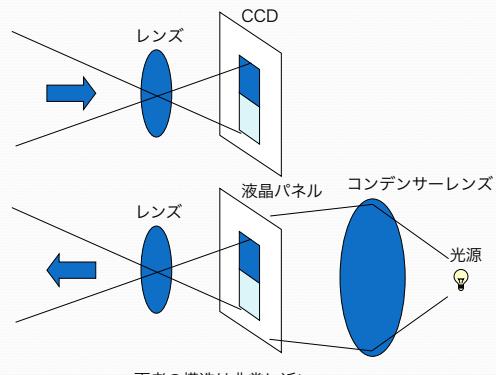
7th ICPR, 1984 (佐藤)

## 機械式プロジェクタ

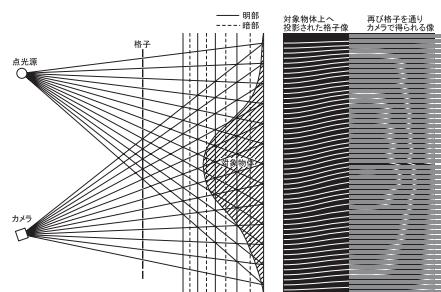


- 7パターン+照明用パターン（素通し）の8種類のマスクを回転して切り替え

## プロジェクタとカメラの構造



## モアレ法



- 絶対的な高さ(位相)を推定する必要がある

## 固定パターン投影法

### • Kinect

- 回折光学素子(DOE)によりランダムパターンを生成



[http://blog.livedoor.jp/helloworld\\_since2003/archives/65341279.html](http://blog.livedoor.jp/helloworld_since2003/archives/65341279.html)

## 固定パターン投影法の特性

- 動物体の計測に向く
  - 計測速度は画像入力速度に等しい  
(計算時間は別途必要。Kinectでは、ハードウェアによりパターン照合処理を実行)
- 空間解像度は高くない
  - 一定の大きさの領域内のパターンを照合するため、空間解像度はパッシブステレオ法に近い
  - 計算の高度化により解像度を上げることは出来る(例:各ドットごとの対応付けなど)

## 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(直接法)
- 位相差測定法(間接法)
- 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

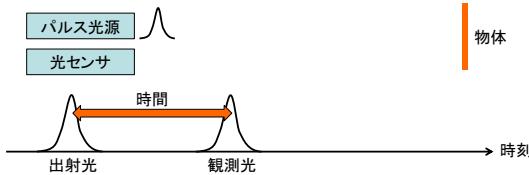
- 距離と照度の関係を利用する方法
- shape from X (shading, texture, motion, etc.)

## 光飛行時間測定法 (時間差計測法, 直接法)

- パルス光の利用

– パルス光を対象物体へ照射し、戻ってくるまでの時間を利用して距離を求める

– 長距離の計測を対象とした装置に多い

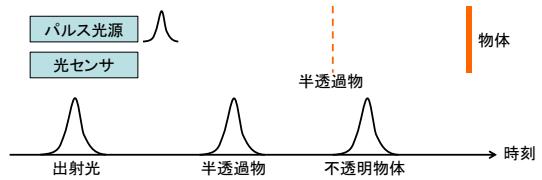


## 時間差計測法のメリット

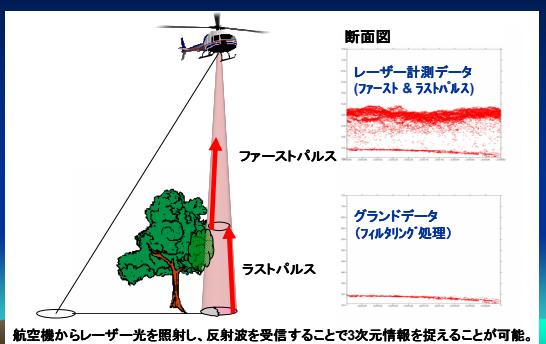
- 半透過物が途中にある場合

– 複数のパルス光が観測されたり、弱い反射光が一定時間観測されることがある

– 最終パルスを用いることで除去できる



## 航空レーザ測量



[http://www.arida-jp.com/The1stWorkshopDDCH/2007\\_1stDDCH\\_presentation/s3-1.pdf](http://www.arida-jp.com/The1stWorkshopDDCH/2007_1stDDCH_presentation/s3-1.pdf)

## 光飛行時間測定法に基づくレンジファインダー

- 遠距離物体の計測に向いた手法  
(近距離物体の計測は得意)

- 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



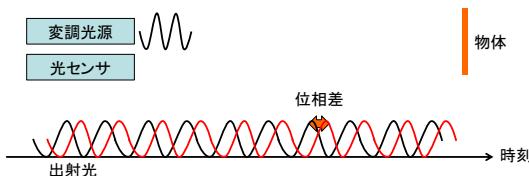
などが市販されている

## 位相差測定法(間接法)

- 周期的に強度変調した光の利用

– 輝度変調した光を対象物体へ照射し、戻ってきた光の位相遅れを利用して距離を求める

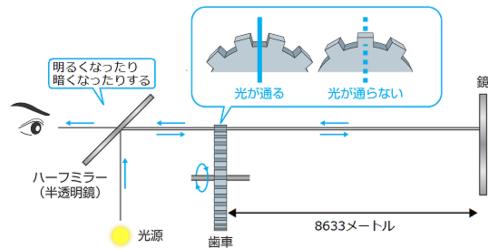
– 短距離の計測を対象とした装置に多い



## フィズーの実験

- 光速の計測(1849年)

– 8633mを光が往復すると 57マイクロ秒遅れる  
150個の歯がある歯車を 3600rpmで回転させると暗くなる



## フィゾーの実験のポイント

### ・光強度の変調のメリット

- 光デバイスがなくても、**光を高速に遮断・透過出来るシャッター**があれば、光速を計測できる

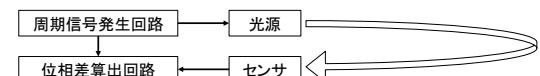
- 遮断と透過を繰り返すことで、見かけの光量を大きくすることが出来る

### ・光強度変調の特徴

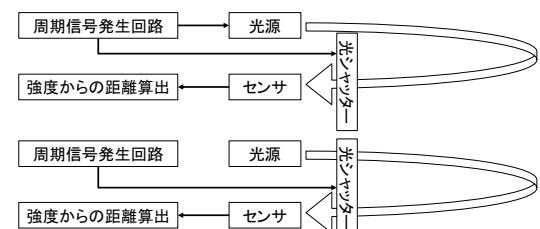
- 光飛行時間が**輝度**に変換される

## 位相差の検出方法

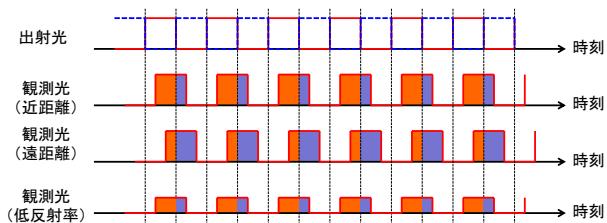
位相差を電気的に求める方法



位相差検出をシャッターにより実現する方法



## 位相差検出法の原理



- 観測光の強度は対象物体の反射率によっても変化するので、逆位相の強度情報が必須となる

## 自動走行に向けて



- 小型化・高性能化・低価格化が急速に進展

## 手法の分類

	光の直進性に基づく計測法 (幾何学的構造)	光速に基づく計測法 (時間的構造)
能動的計測	スリット光投影法 コード化パターン光投影法 固定パターン投影法 モアレ法	光飛行時間測定法 強度変調光位相差測定法 干渉計
受動的計測	ステレオ法 + 光パターン照射	なし

## 様々な三次元 計測装置

