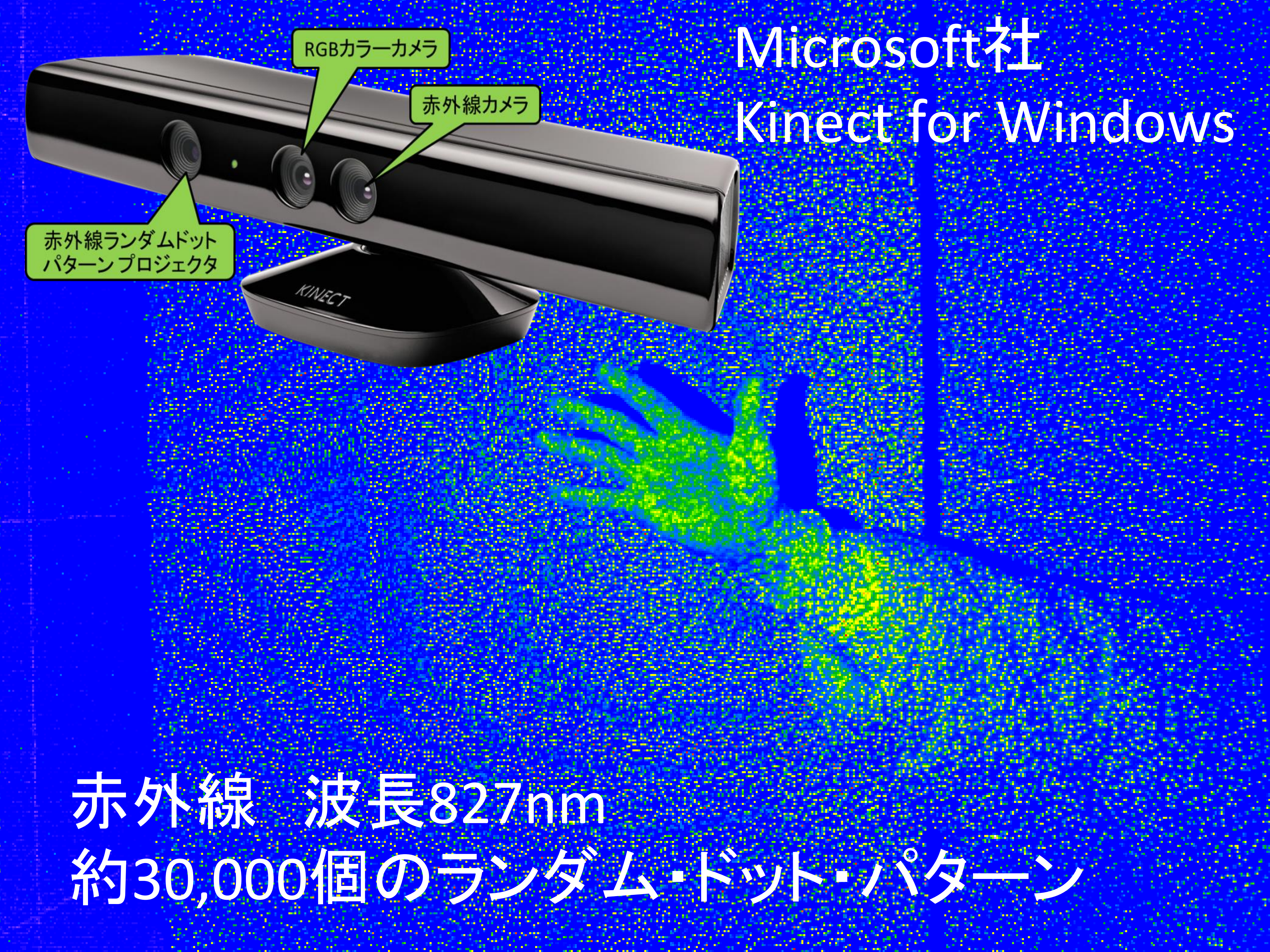
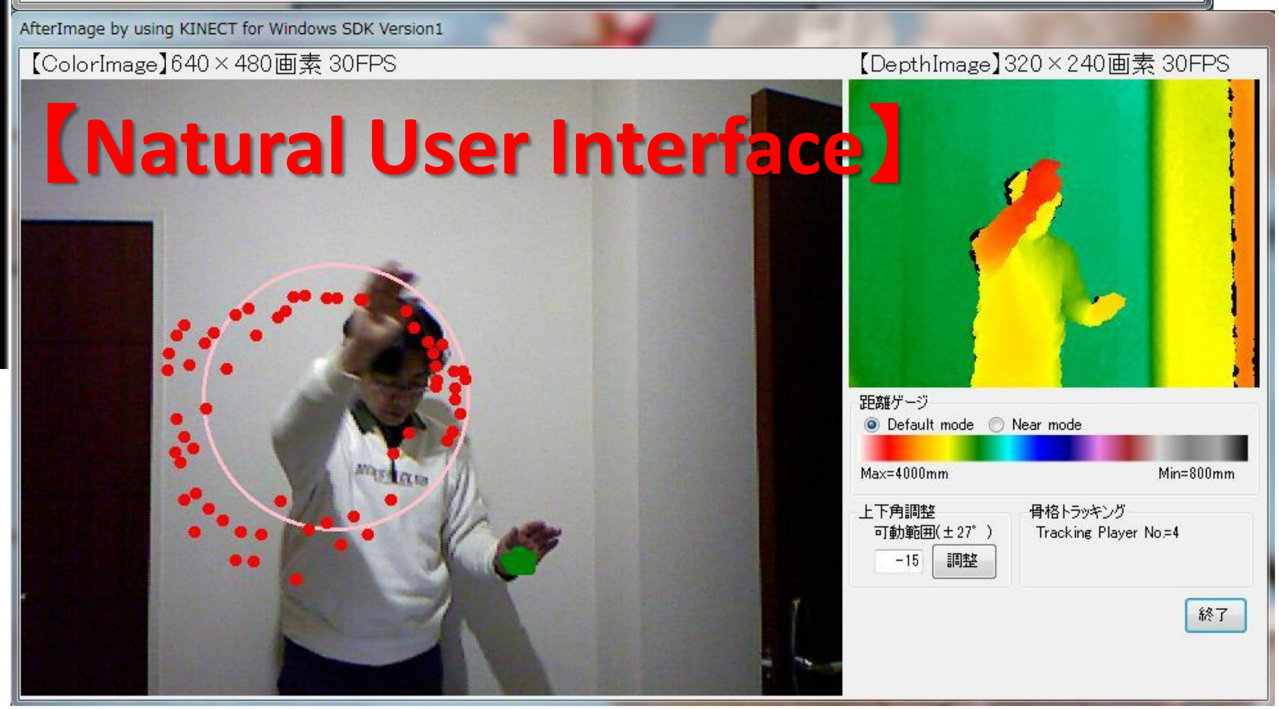
ランダムドットパターン投影法による デプスカメラの動作原理

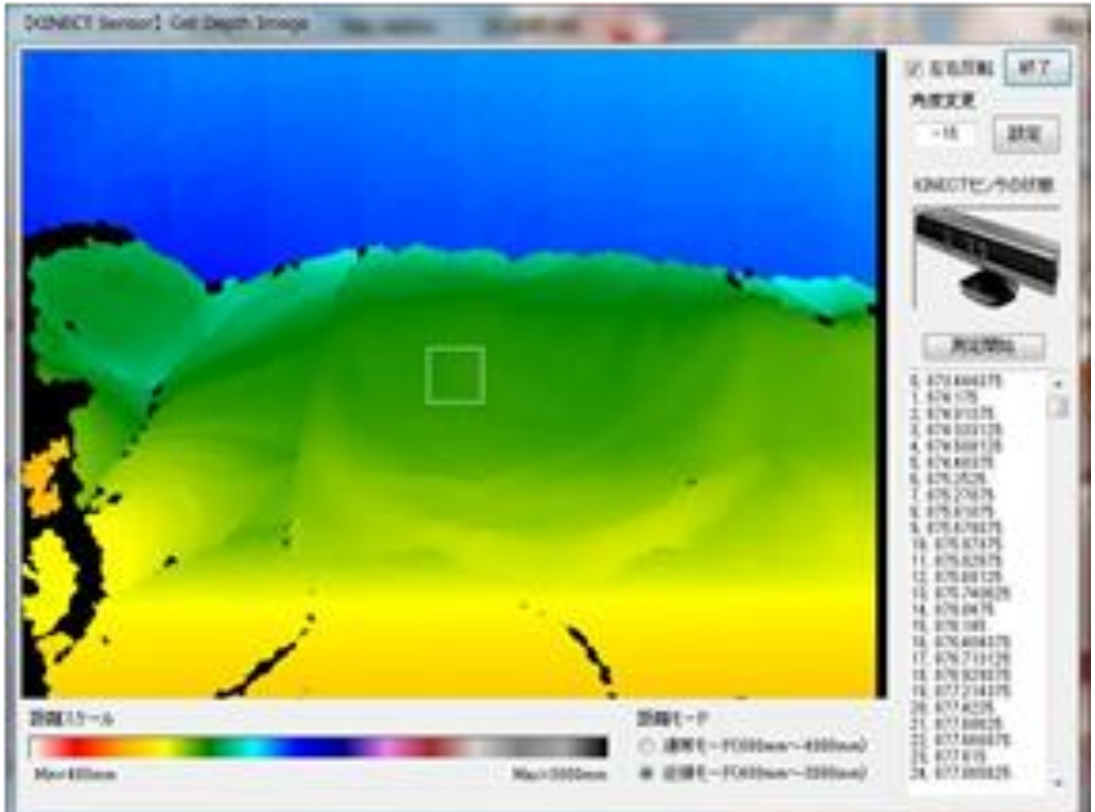
上田智章（Neo-Tech-Lab）


Microsoft社
Kinect for Windows
RGBカラーカメラ
赤外線カメラ
赤外線ランダムドット
パターンプロジェクタ
KINECT
赤外線　波長827nm
約30,000個のランダム・ドット・パターン

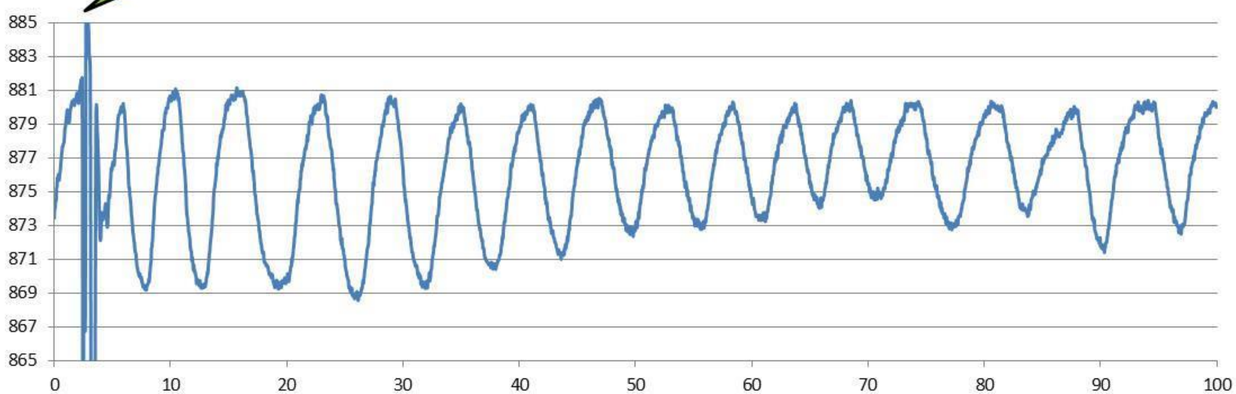
Neo-Tech-Lab.com

【デプス画像】



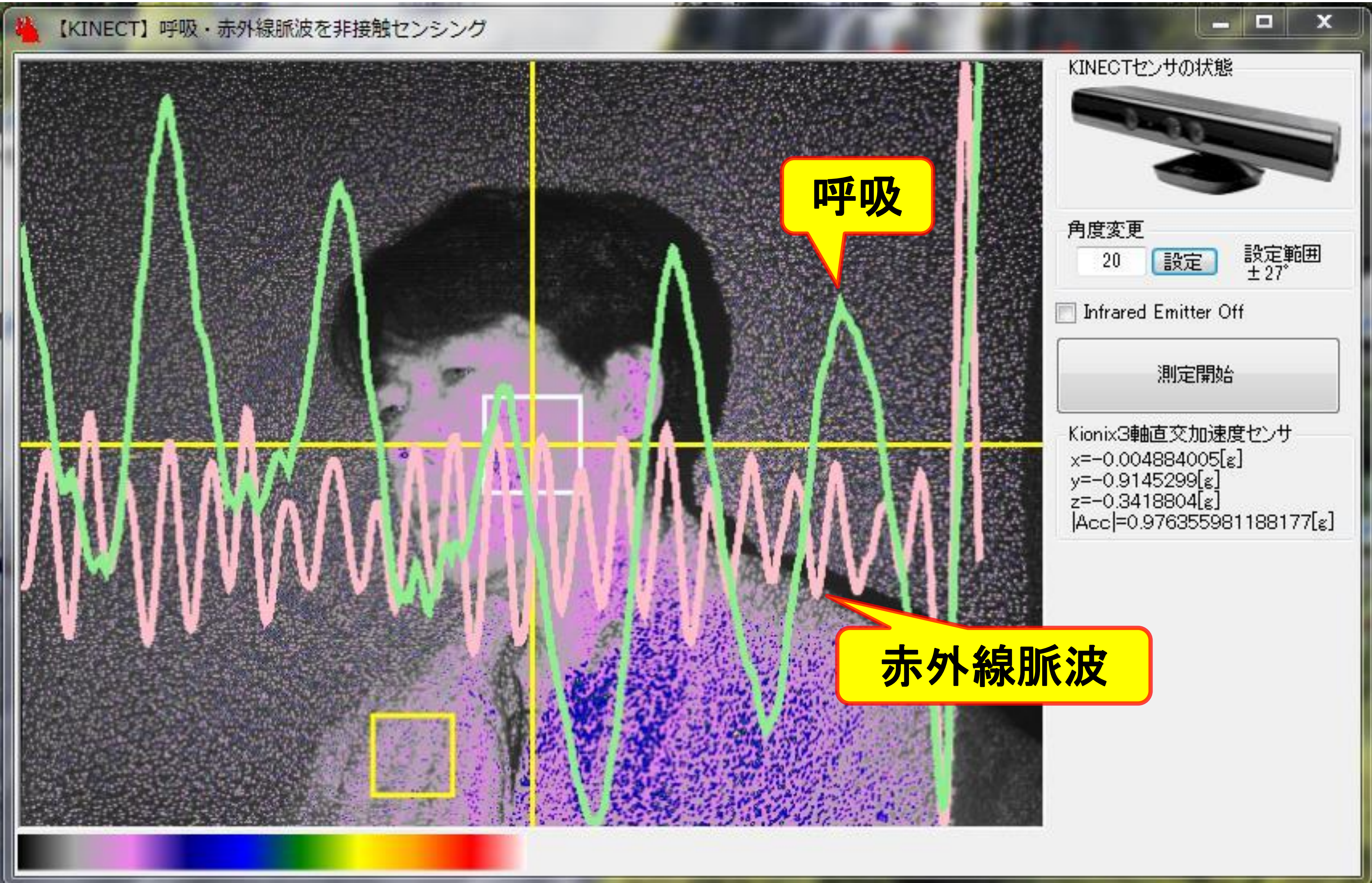


タオルケットをかぶっているところです。



【理由】
赤外線ランダム・ドットで非接触バイタル・センシング

Neo-Tech-Lab.com



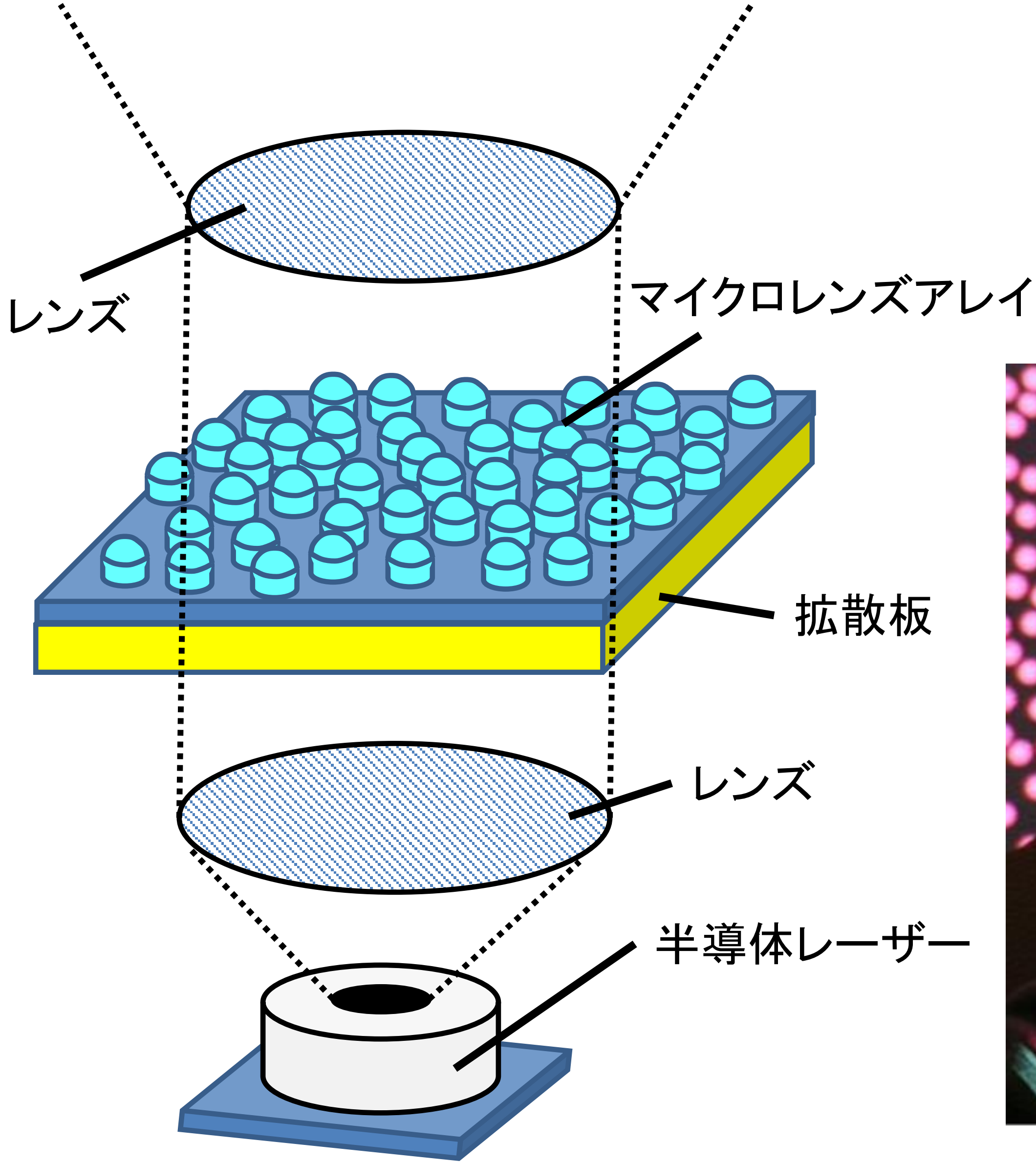
【目的】

Microsoft社
Kinect for Windows

①小型化
②組込マイコンでの利用
③距離範囲、精度の変更

【イスラエル Prime Sense社の特許】

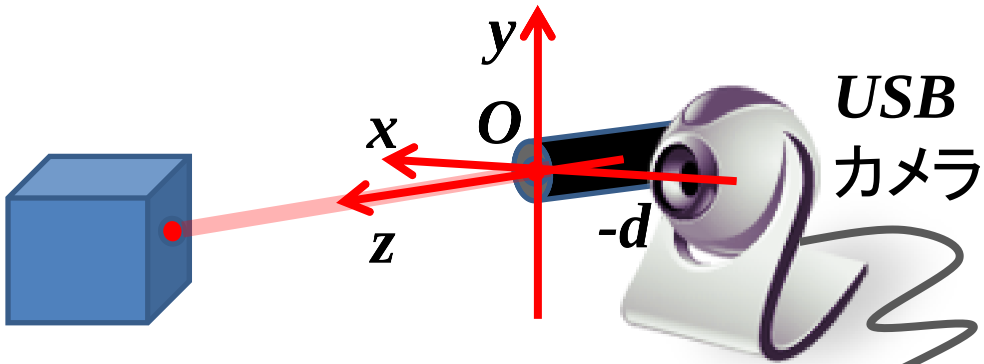
Neo-Tech-Lab.com

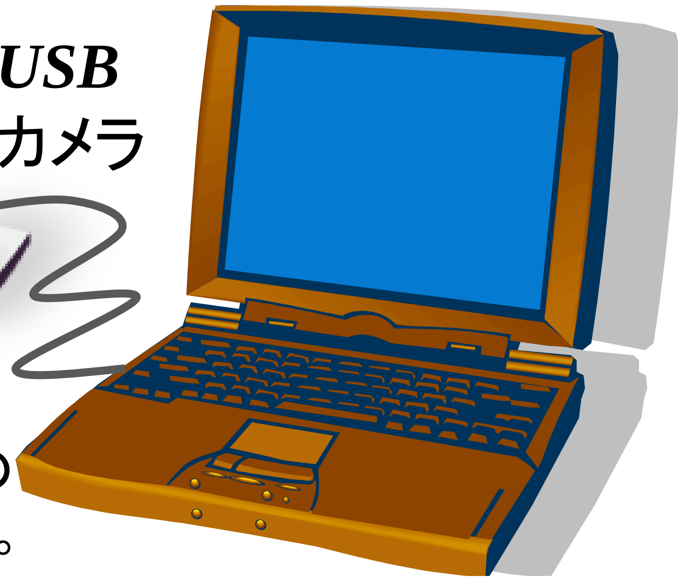


【付記】米国特許出願明細書US20100118123の図7、図8

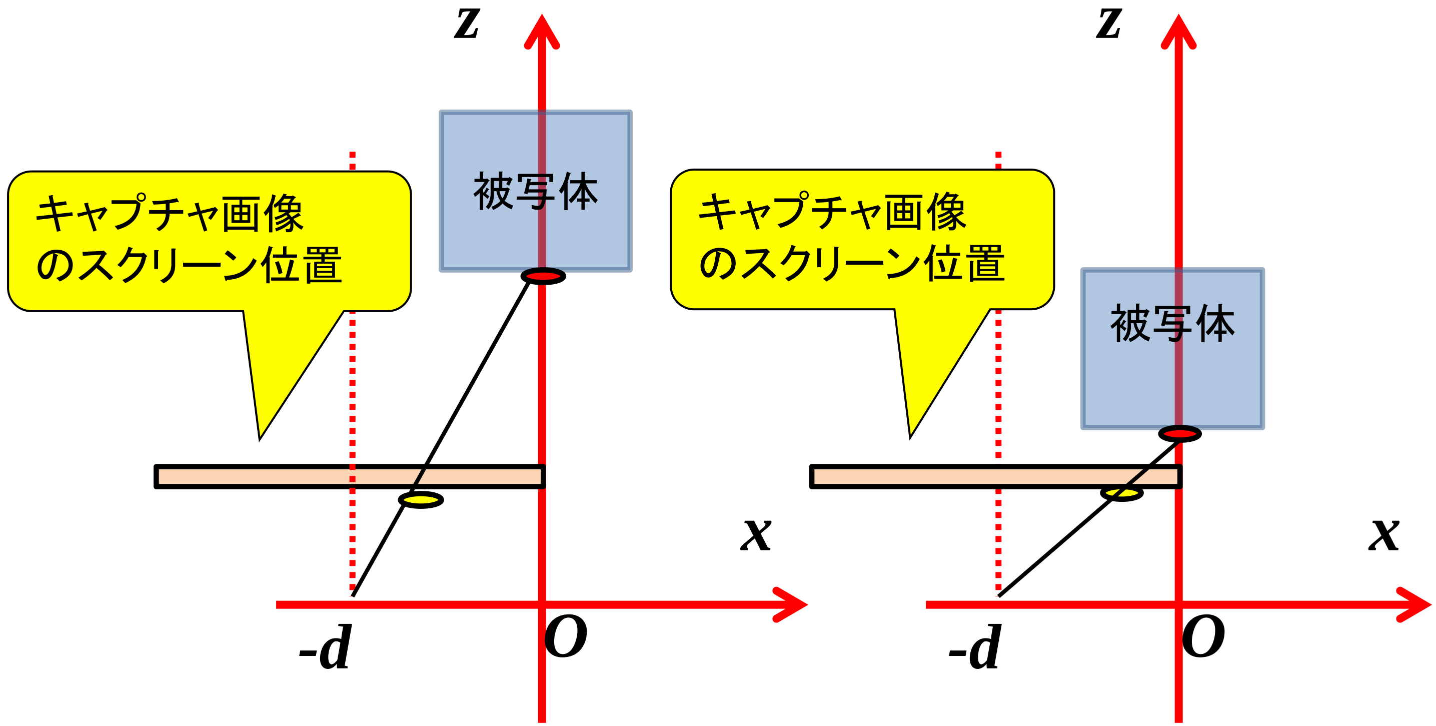
【光切断法】

Neo-Tech-Lab.com





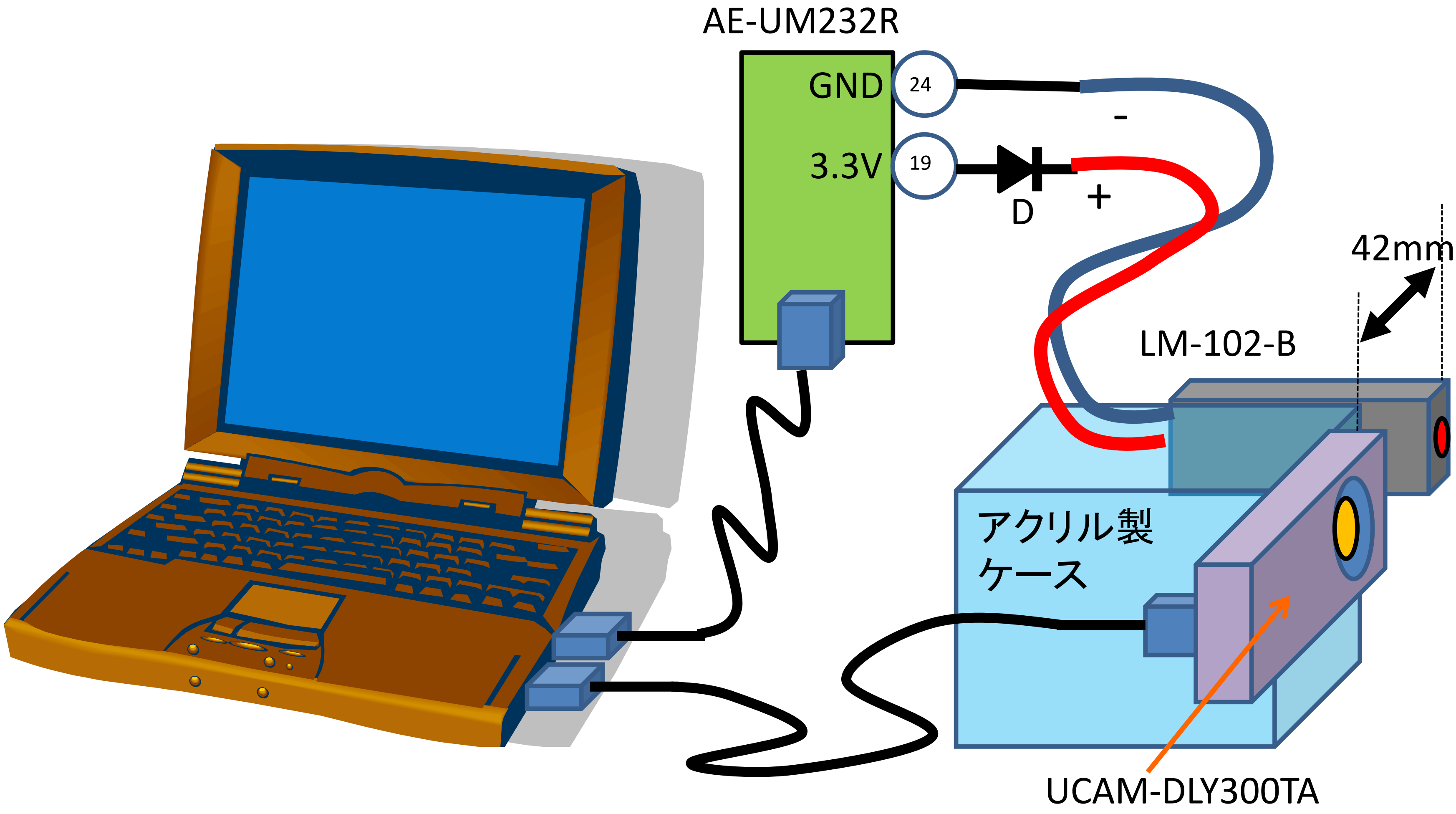
被写体の深度(z)が変われば、カメラで撮影しているレーザーポインターの光点のx座標も水平方向に変化する。



【基礎知識】

Neo-Tech-Lab.com

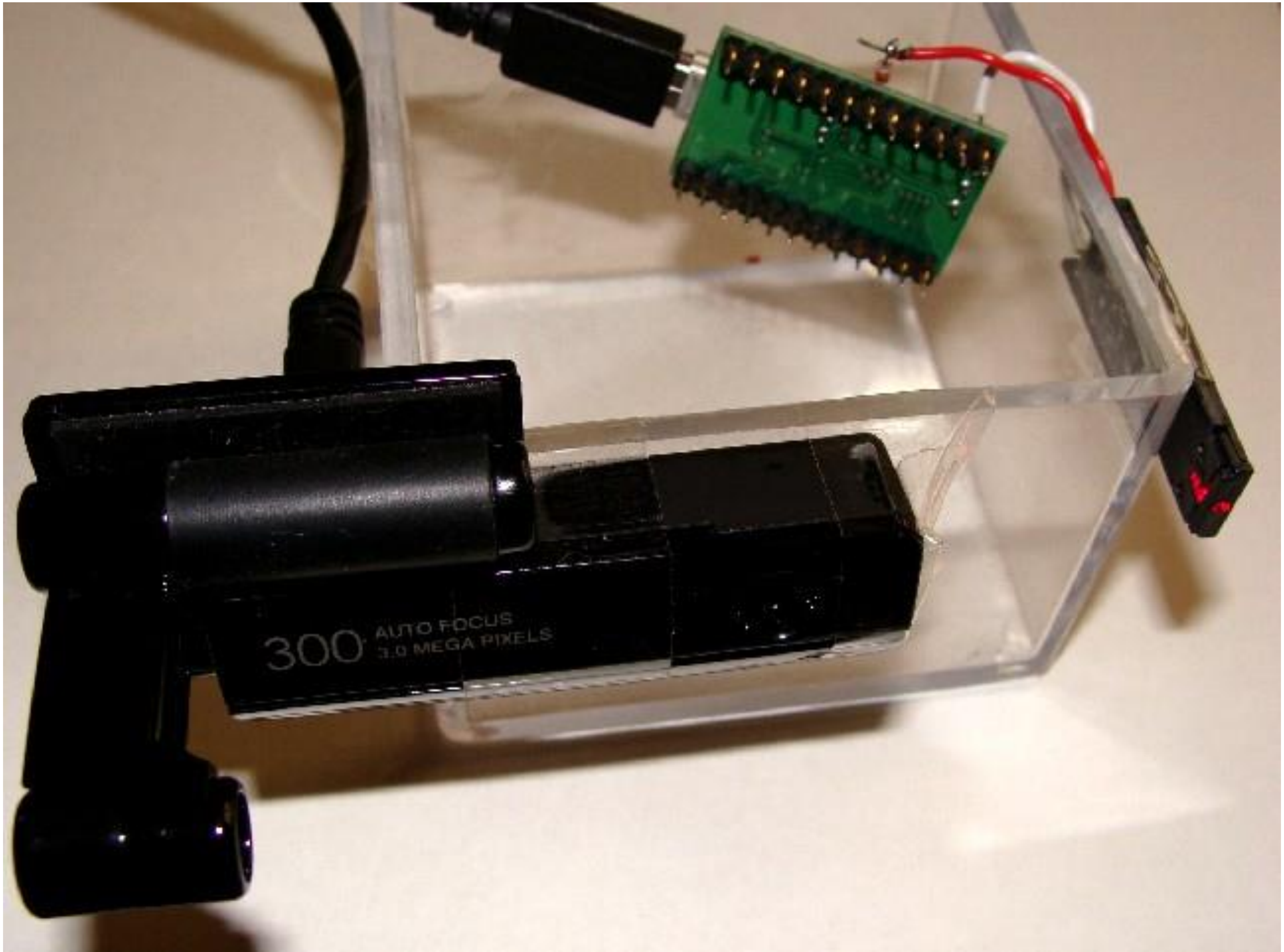
『レーザーポインタとUSBカメラ１台で測距できる』



【基礎知識】

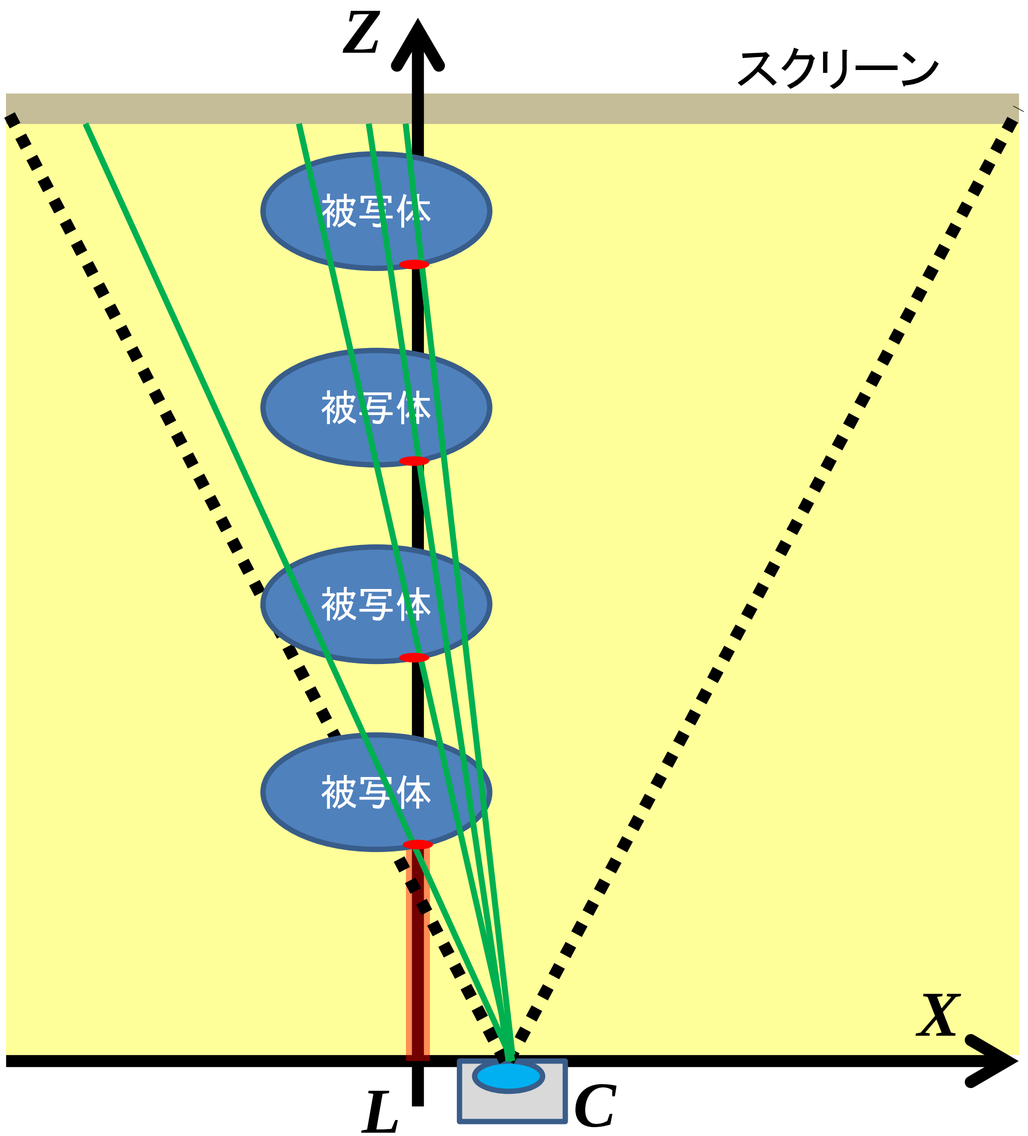
Neo-Tech-Lab.com

『レーザーポインタとUSBカメラ１台で測距できる』

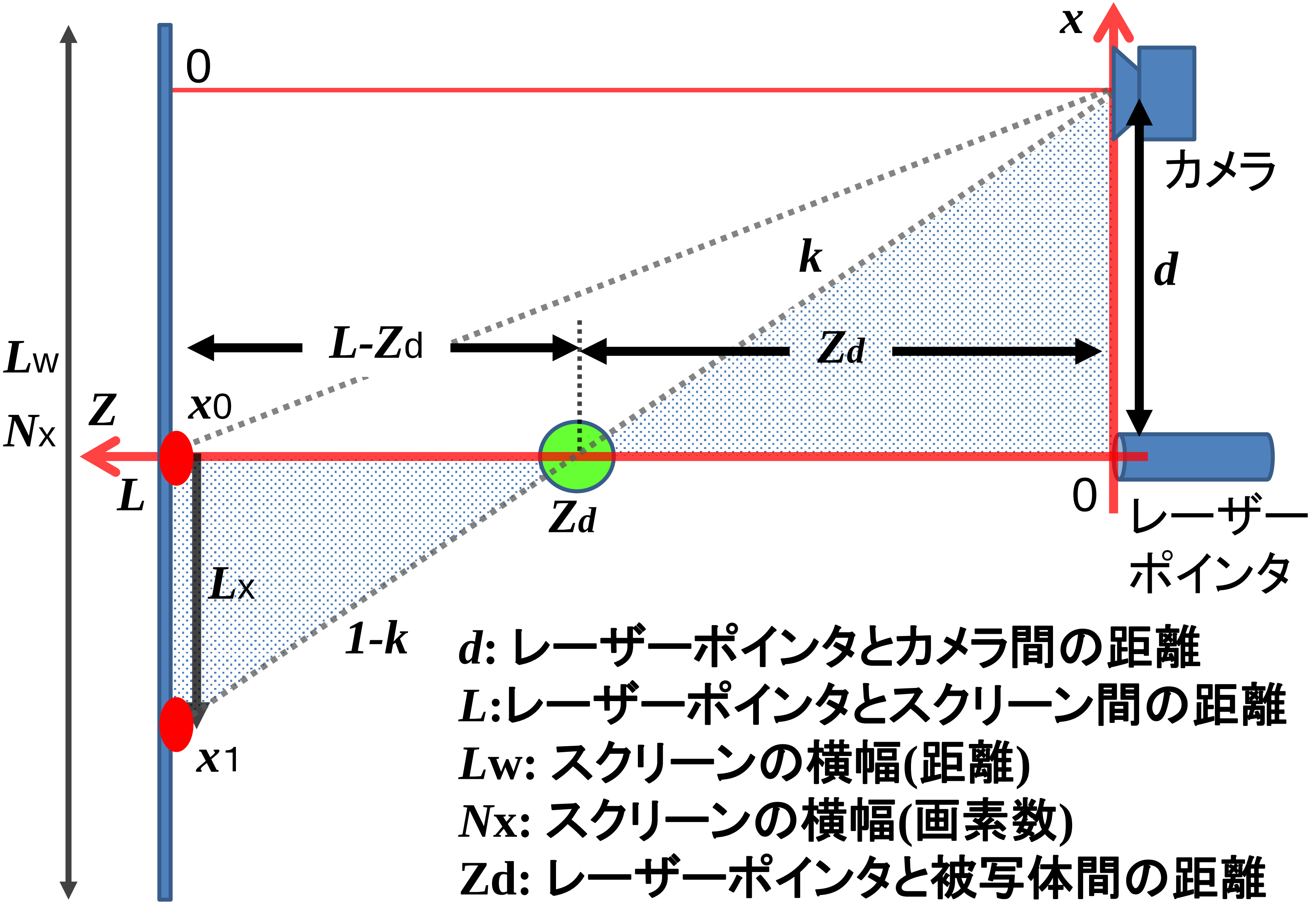


【基礎知識】

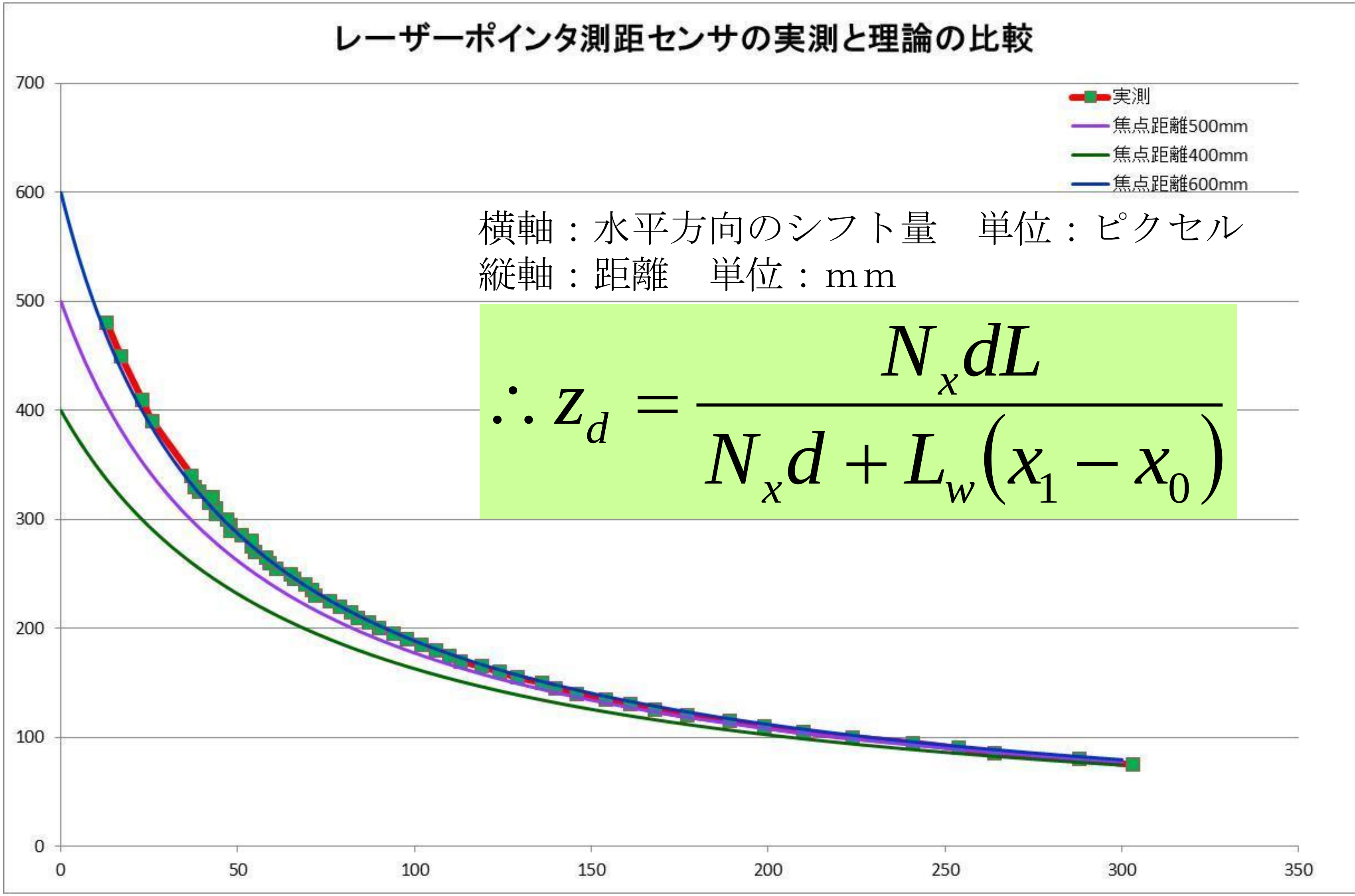
『レーザーポインタとUSBカメラ１台で測距できる』



Neo-Tech-Lab.com

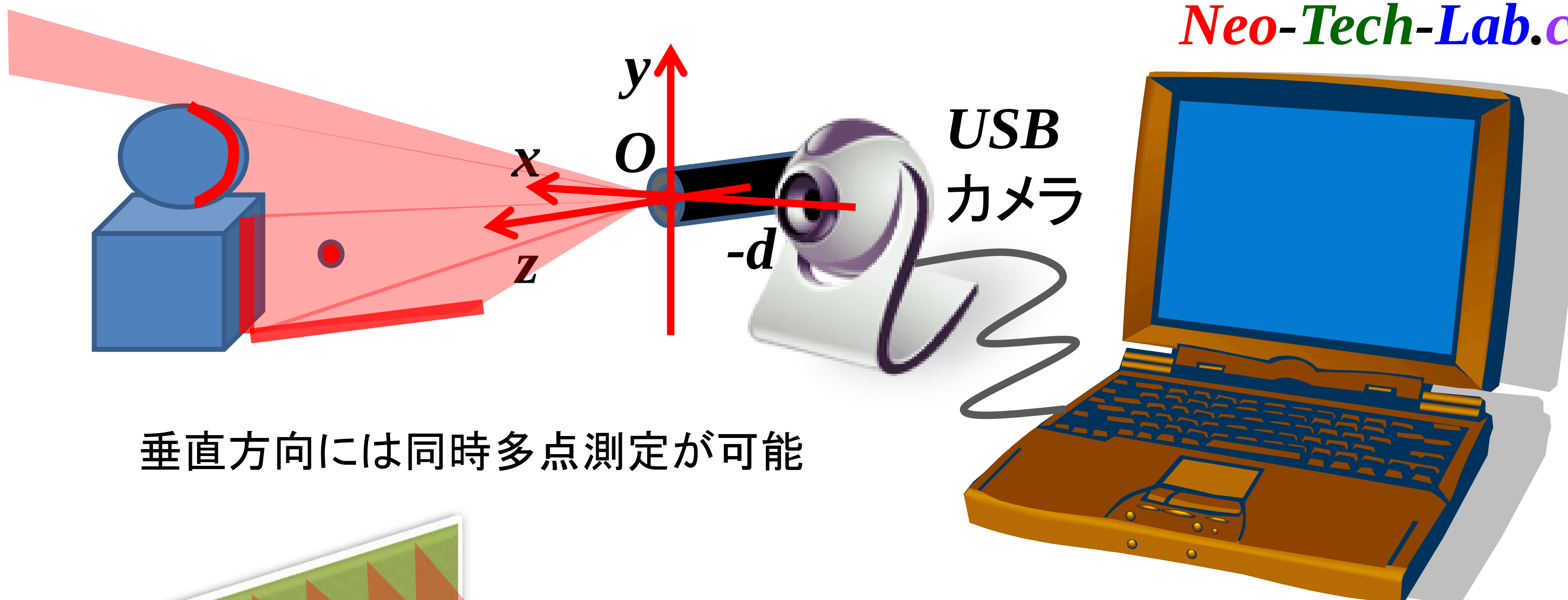


d: レーザーポインタとカメラ間の距離
L:レーザーポインタとスクリーン間の距離
L_w: スクリーンの横幅(距離)
N_x: スクリーンの横幅(画素数)
Z_d: レーザーポインタと被写体間の距離
L_x: 光点のスクリーン上の移動距離
x_1-x_0: 光点の水平移動シフト画素数

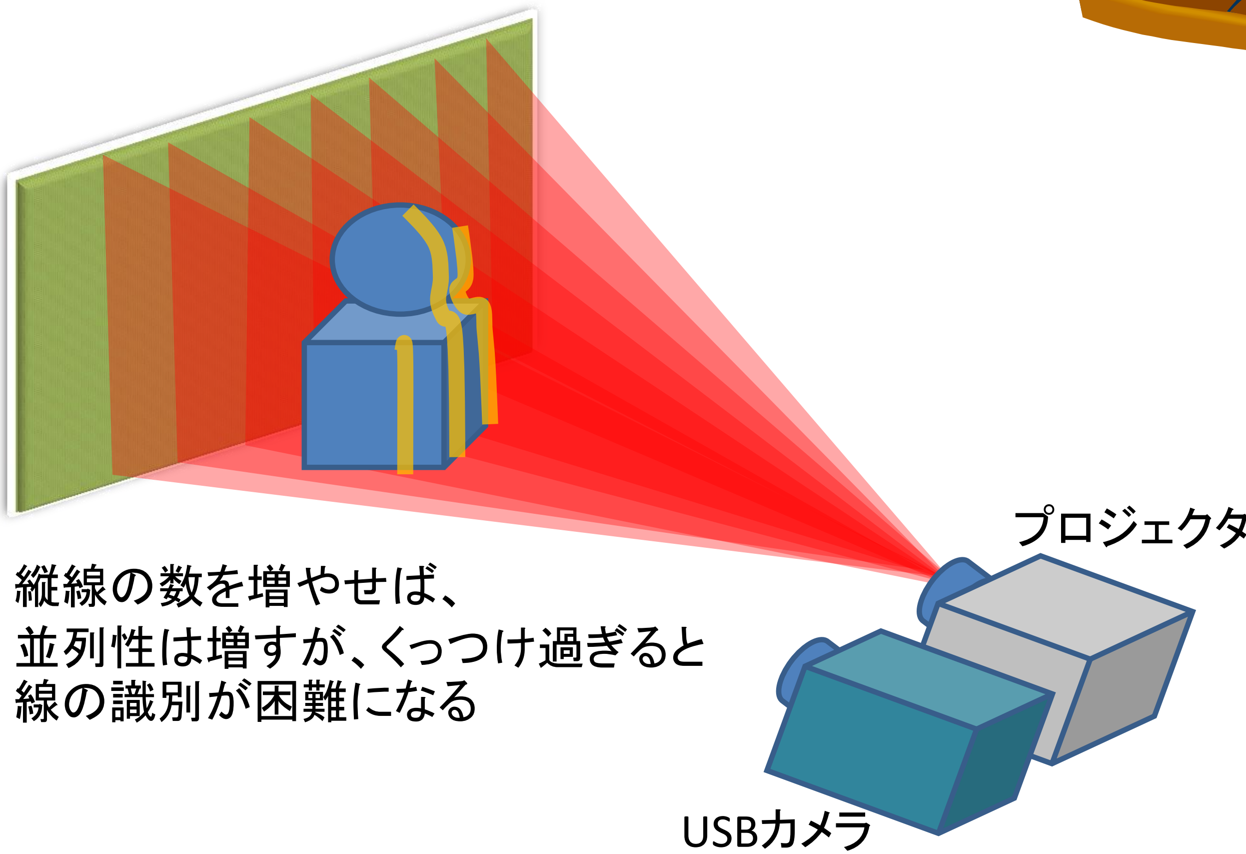


$$\therefore z_d = \frac{N_x d L}{N_x d + L_w \left(x_1 - x_0 \right)}$$

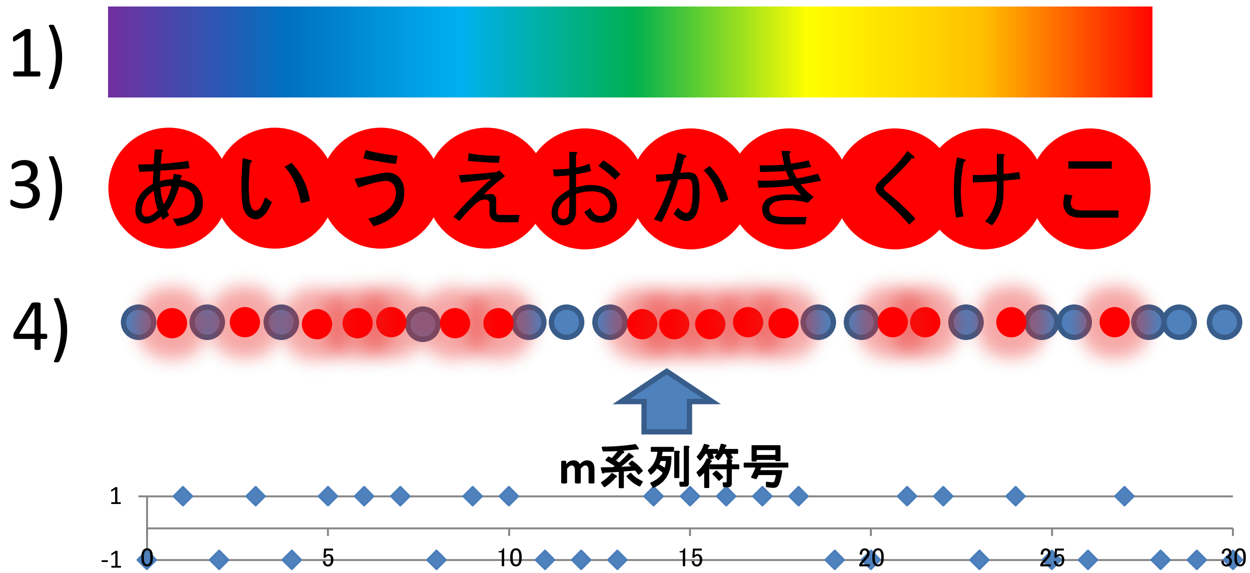
Neo-Tech-Lab.com

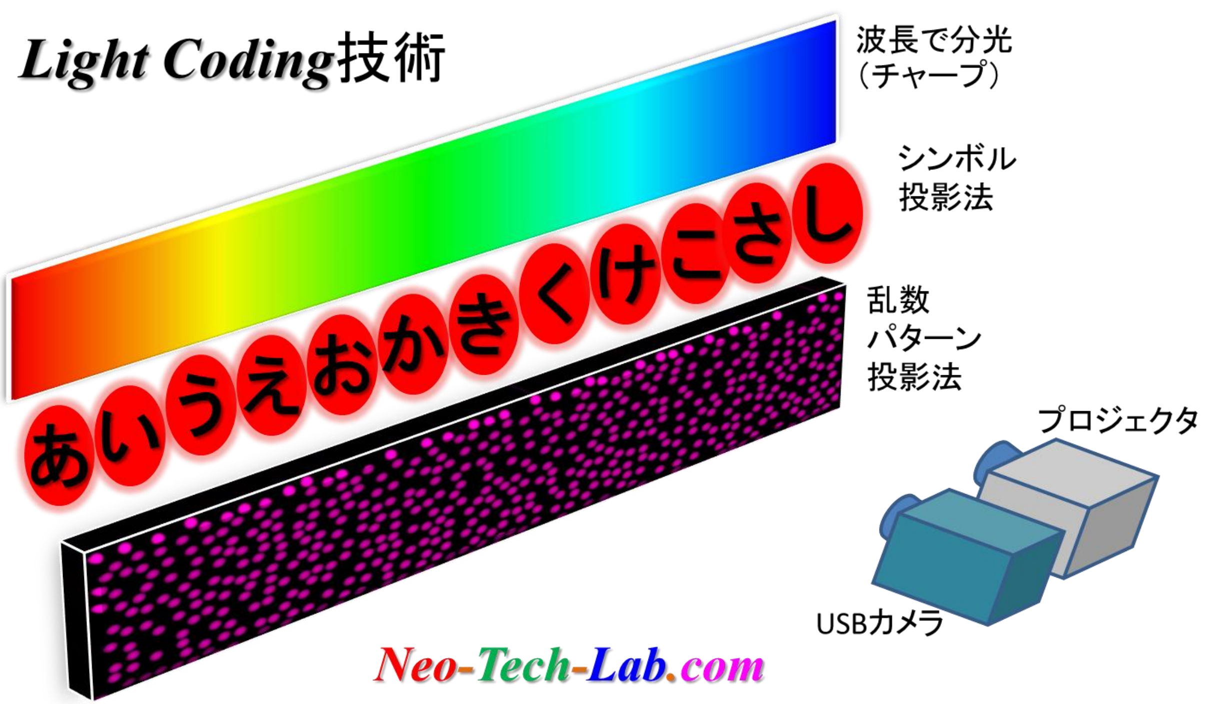


垂直方向には同時多点測定が可能



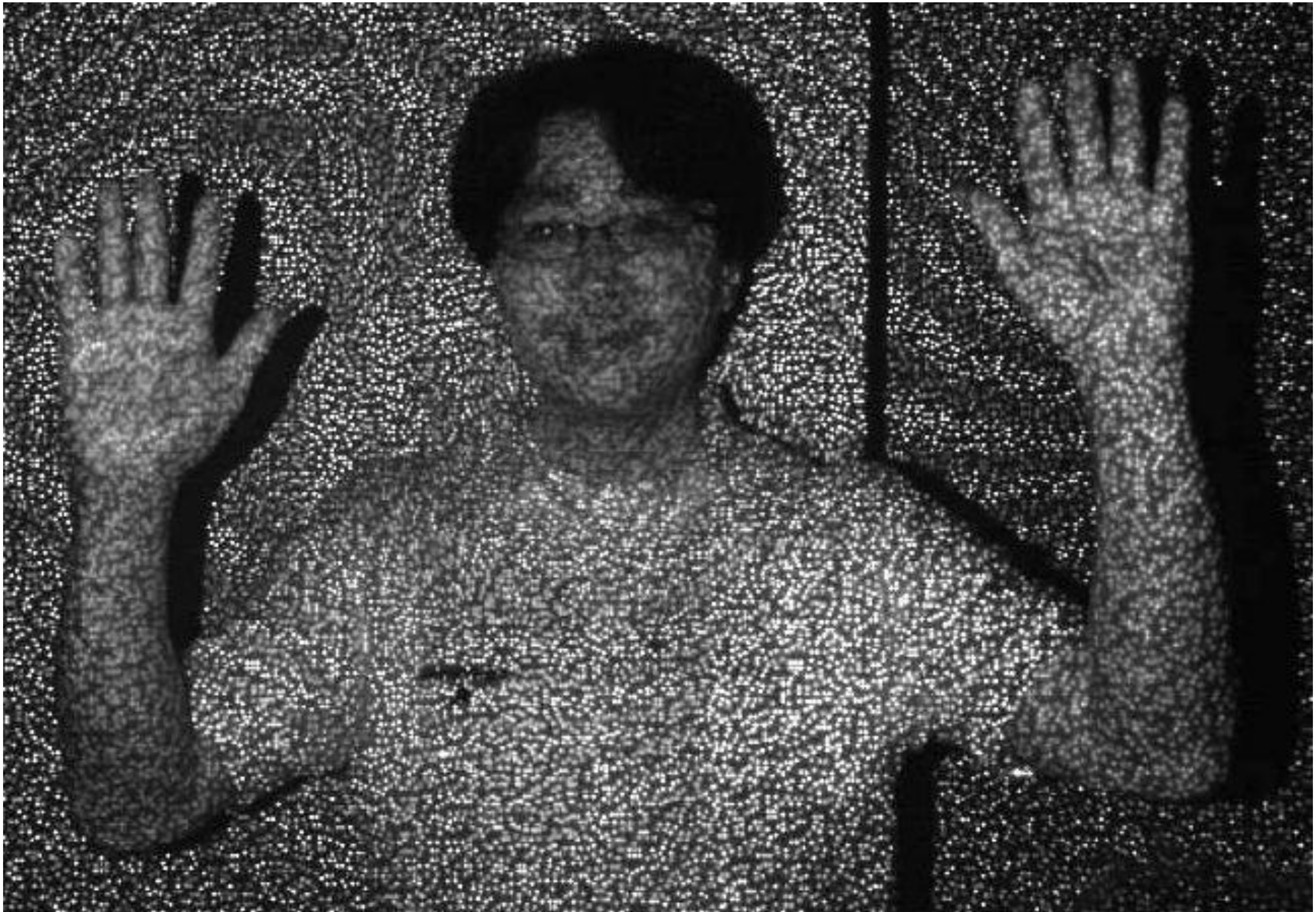
縦線の数を増やせば、
並列性は増すが、くっつけ過ぎると
線の識別が困難になる


1)
3)
あいうえおかきくけこ
4)
m系列符号
1
-1
0
5
10
15
20
25
30


Light Coding技術
波長で分光
(チャープ)
シンボル
投影法
あいうえおかきくけこさし
乱数
パターン
投影法
プロジェクタ
USBカメラ
Neo-Tech-Lab.com


Neo-Tech-Lab.com
【Kinectセンサ】
『デプスカメラの動作原理』
RGBカラーカメラ
赤外線カメラ
赤外線ランダムドット
パターン プロジェクタ
KINECT

【Kinectの赤外線投影パターン】



SDK Ver.1.6のサンプル使用

Neo-Tech-Lab.com

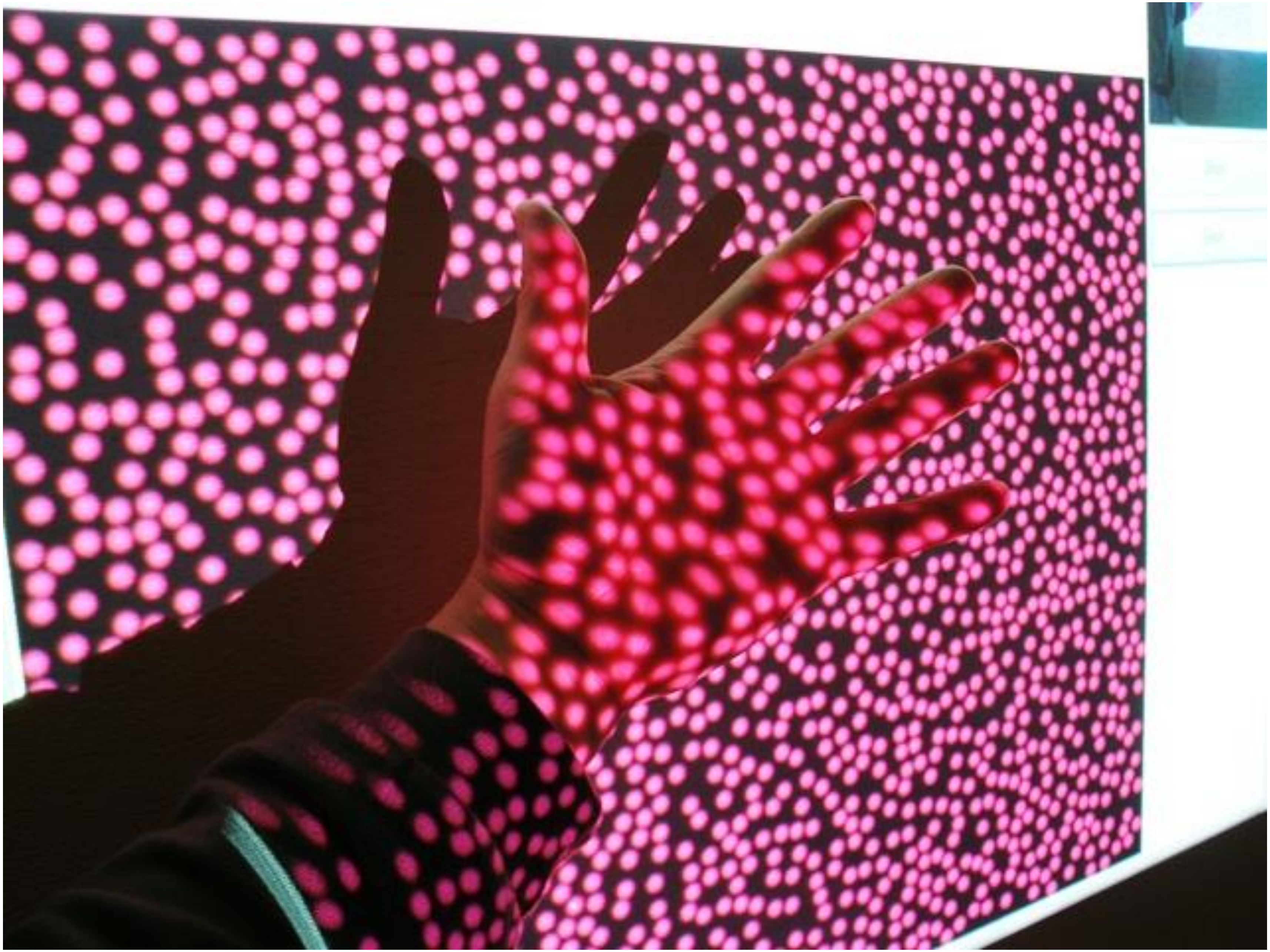
まずは....可視光で実験

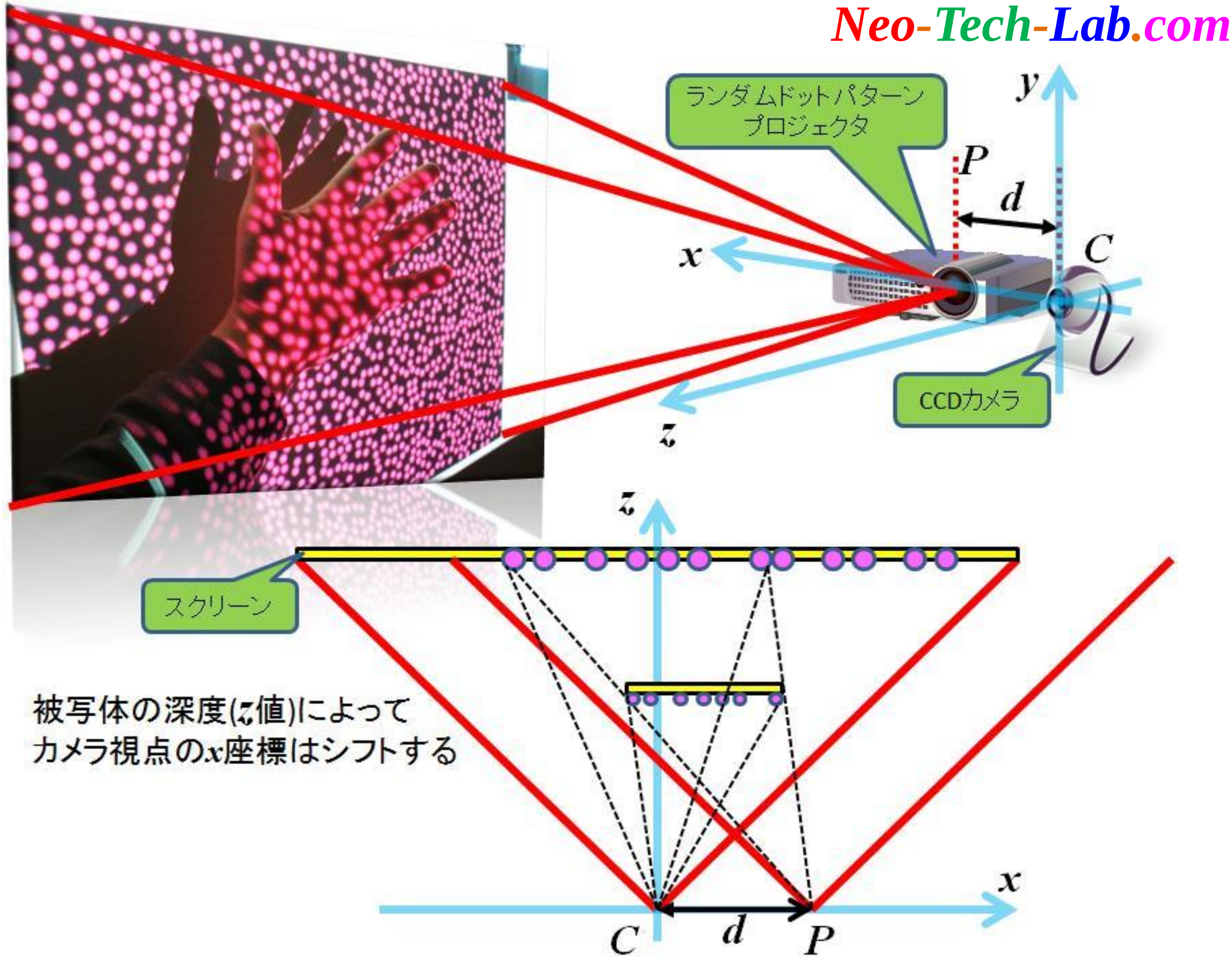
プロジェクタ EPSON EB-S02　　　カメラ ELECOM UCAM-DLY300TA

Neo-Tech-Lab.com

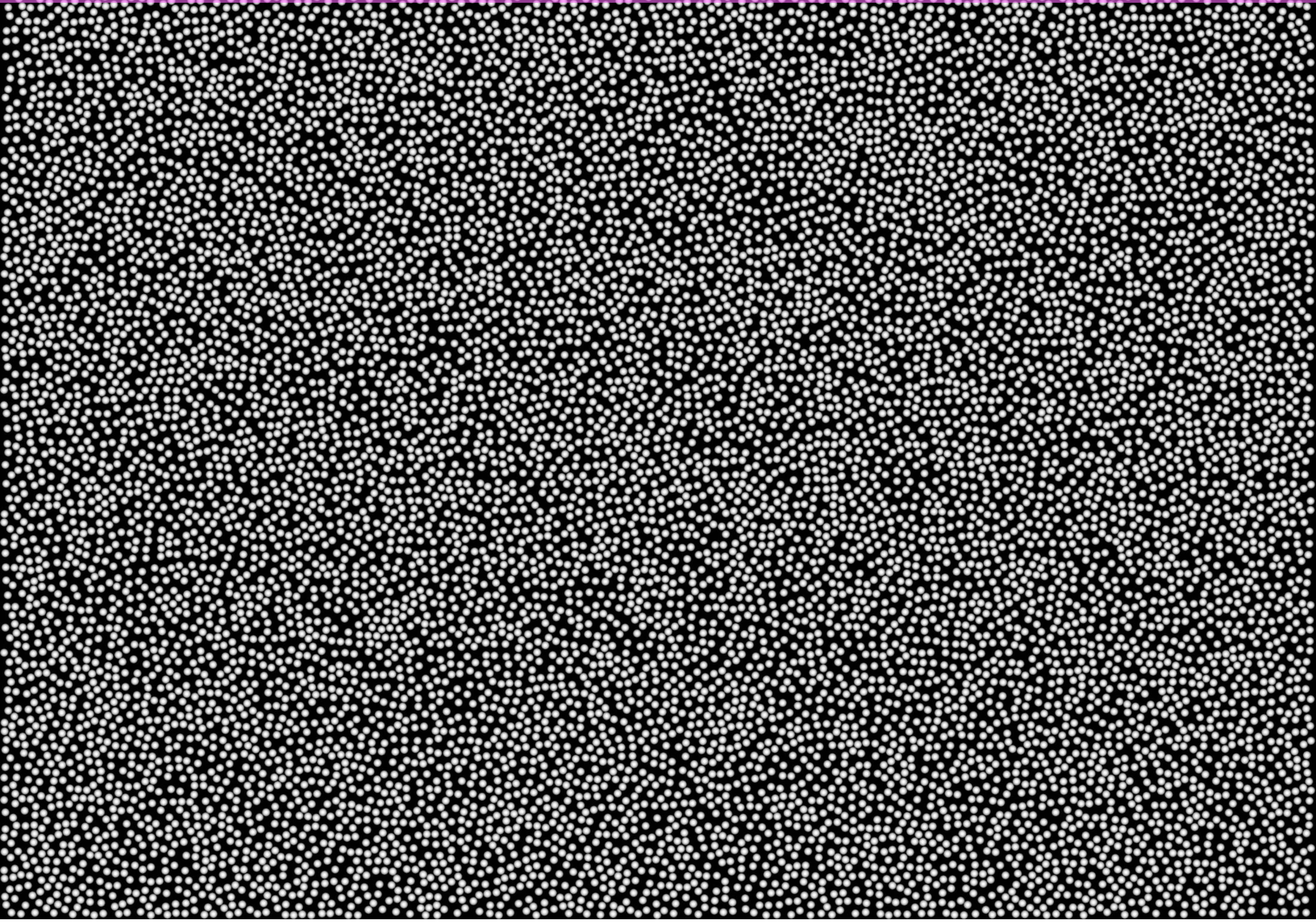
d=140mm

【 再現実験】『Kinect Infrared Random Dot 』

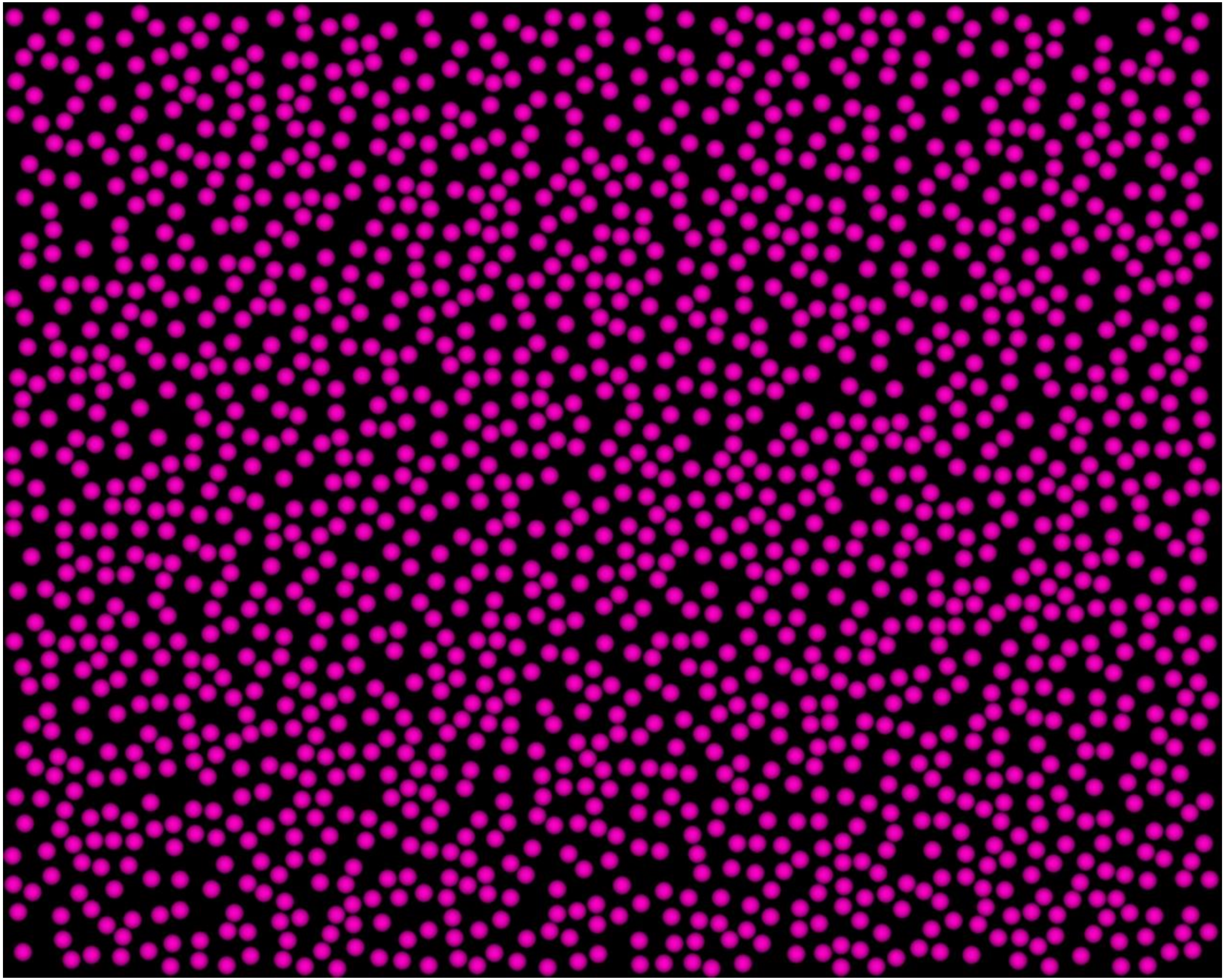



Neo-Tech-Lab.com
ランダムドットパターン
プロジェクタ
P
d
C
x
y
z
CCDカメラ
スクリーン
被写体の深度(z値)によって
カメラ視点のx座標はシフトする
C
d
P

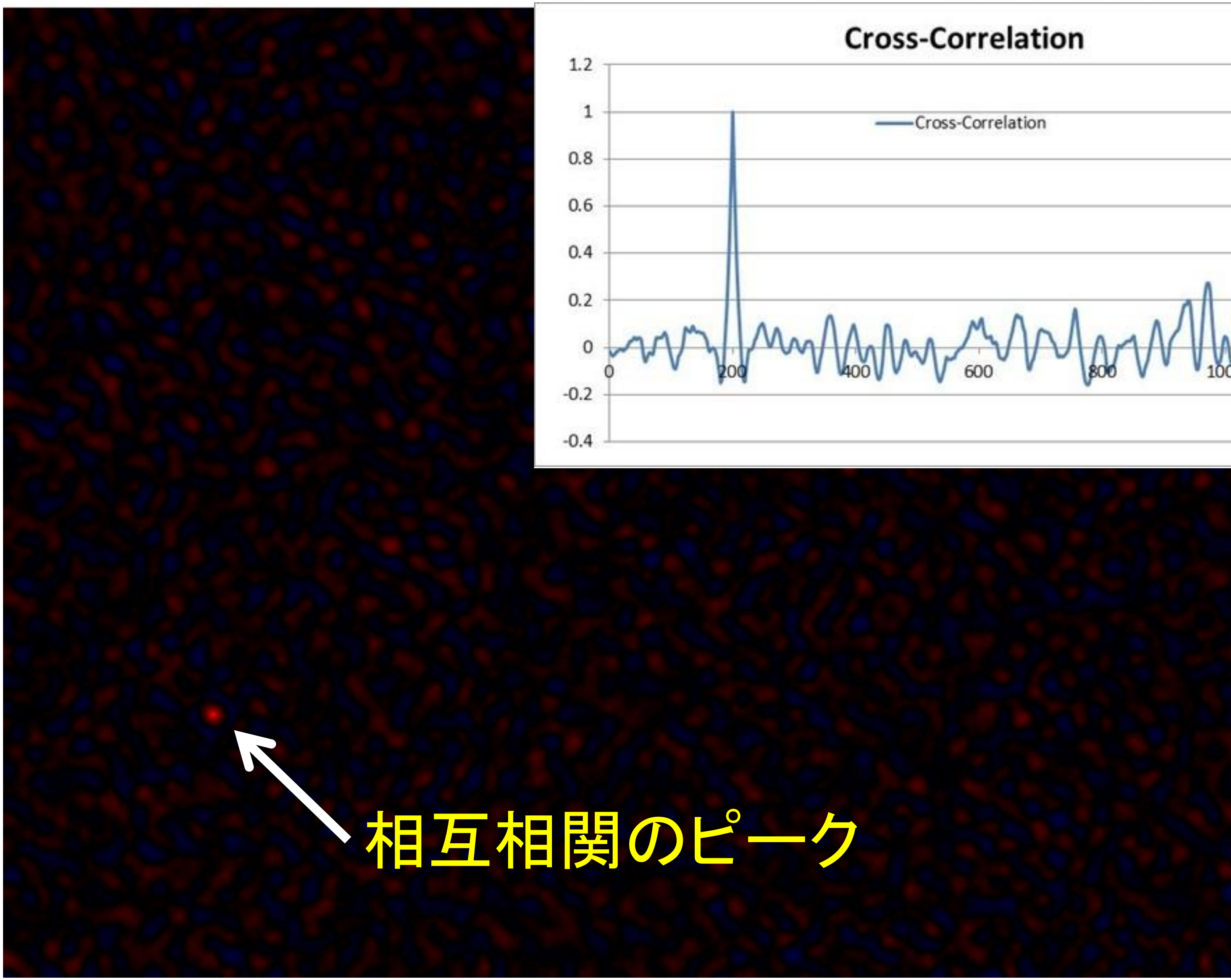
というわけで……..Excel VBAで作成したランダム・ドット・パターン

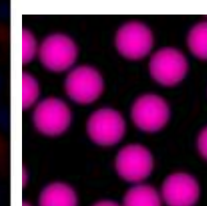


というわけで........**Excel VBAで作成したランダム・ドット・パターン**



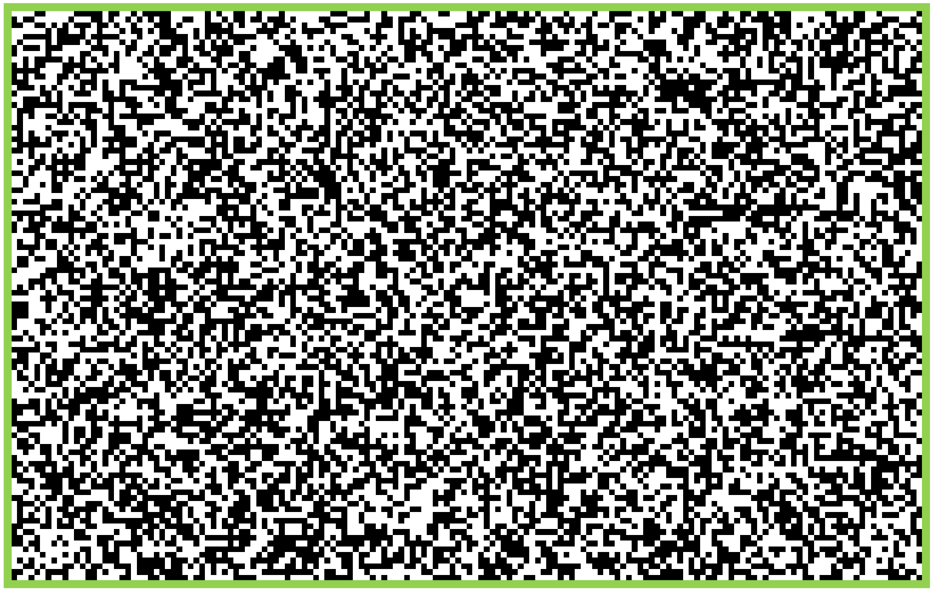
【乱数の性質】重なるのは自分自身の位置だけ。





【m系列符号でランダム・パターン生成】

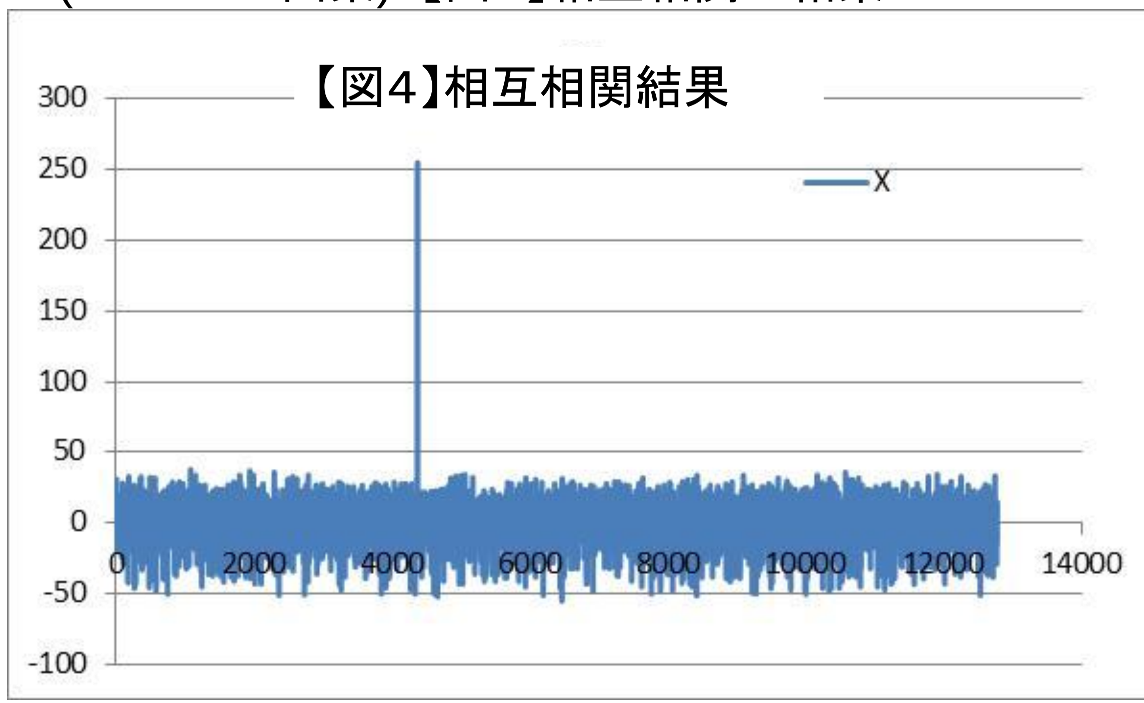
Neo-Tech-Lab.com



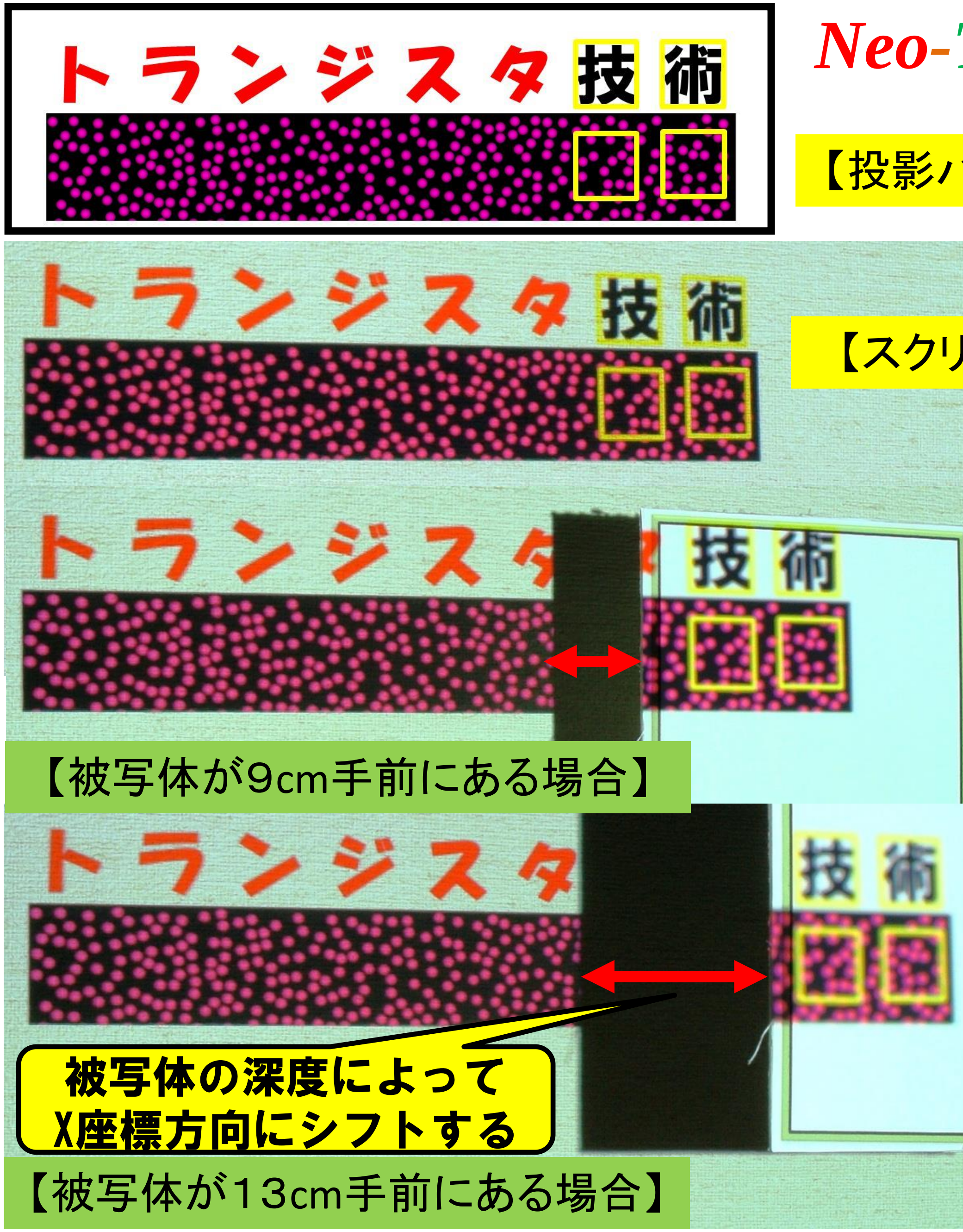
【図１】ランダム・ドット・パターン(160×100画素)

【図３】相互相関の結果

【図２】部分パターン
(20×20画素)

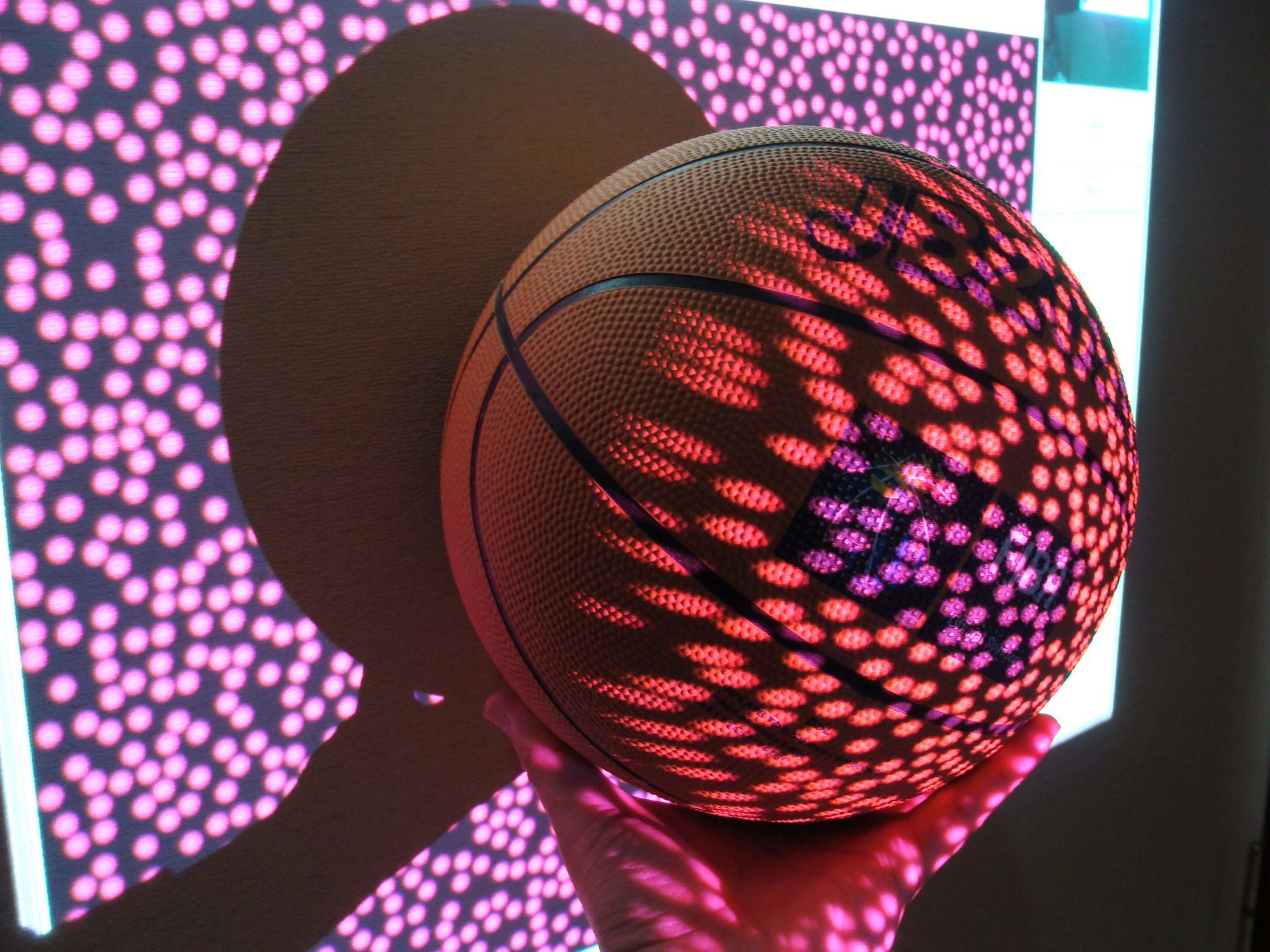


Neo-Tech-Lab.com

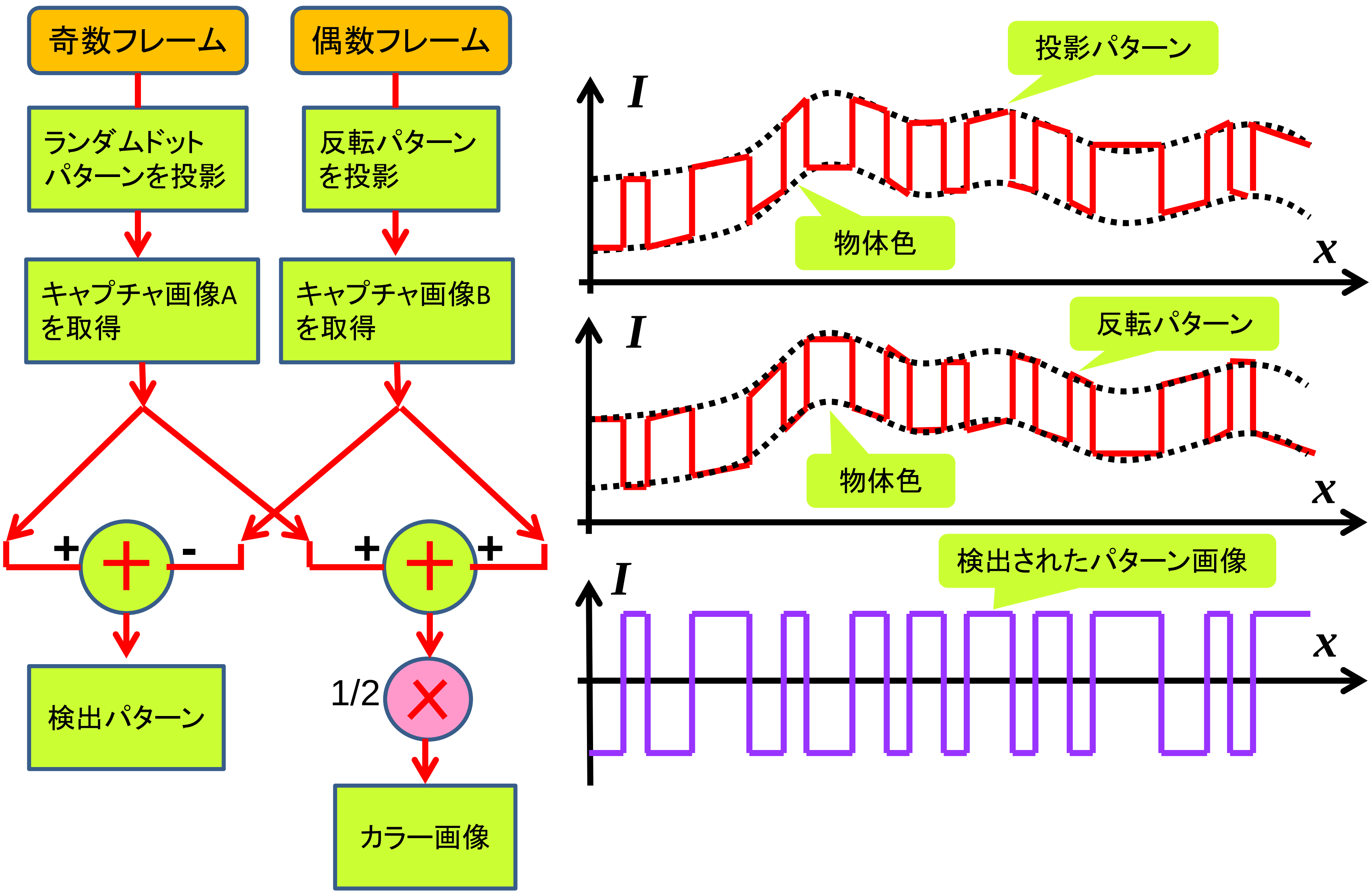


【投影パターン】

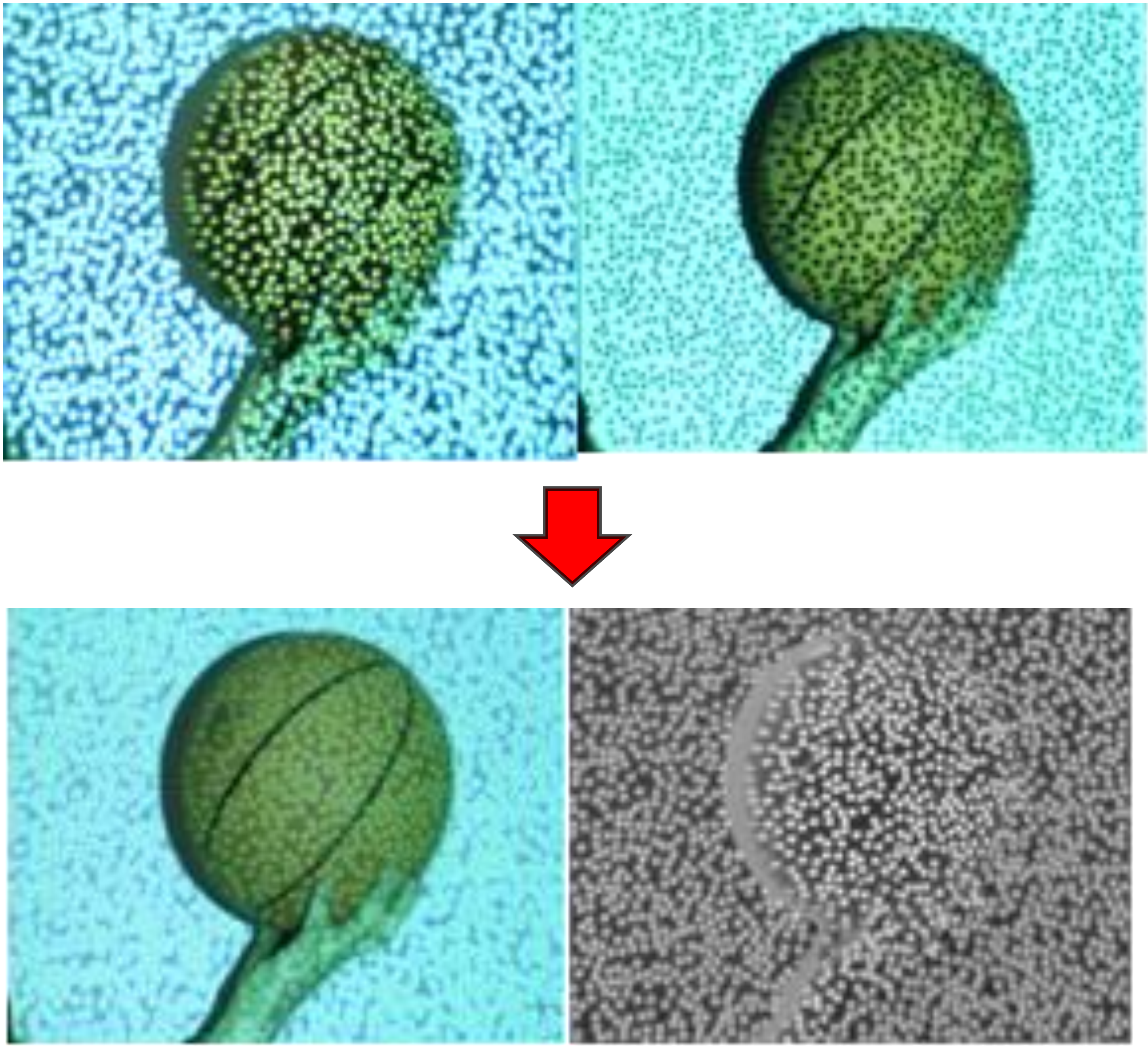
【スクリーン位置】

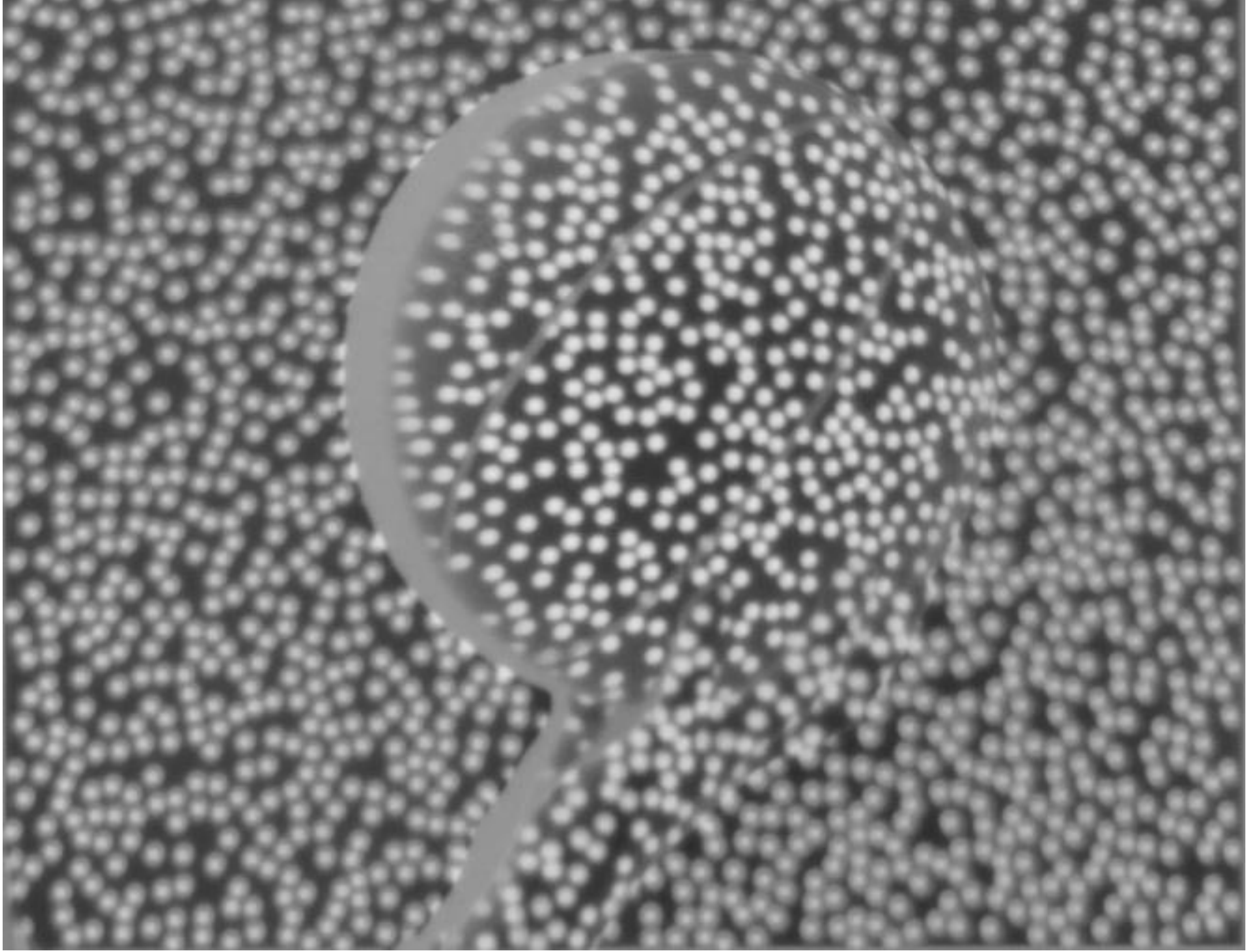


【1個のWebcamにデプスカメラの機能を付与する方法】

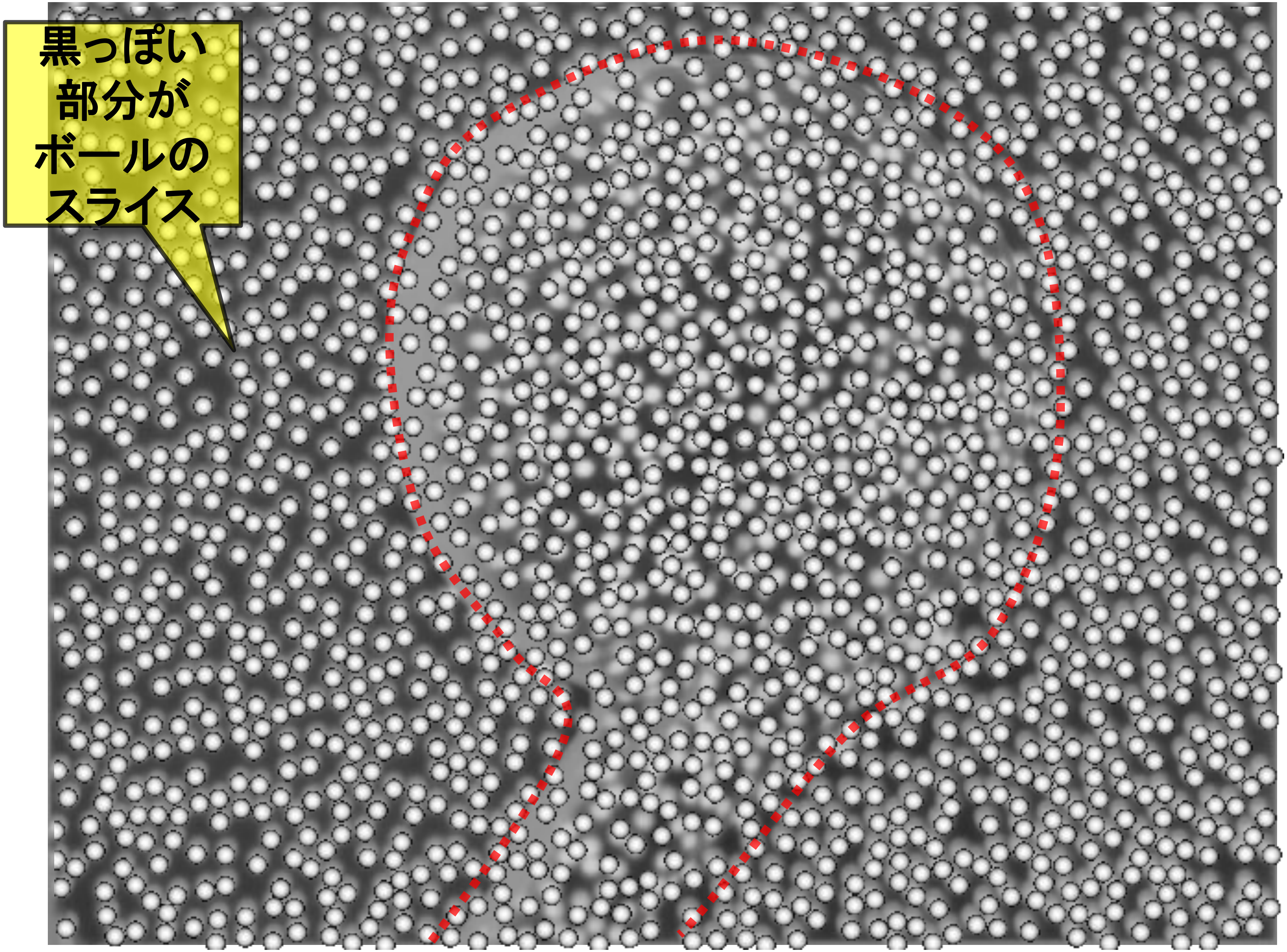


Neo-Tech-Lab.com

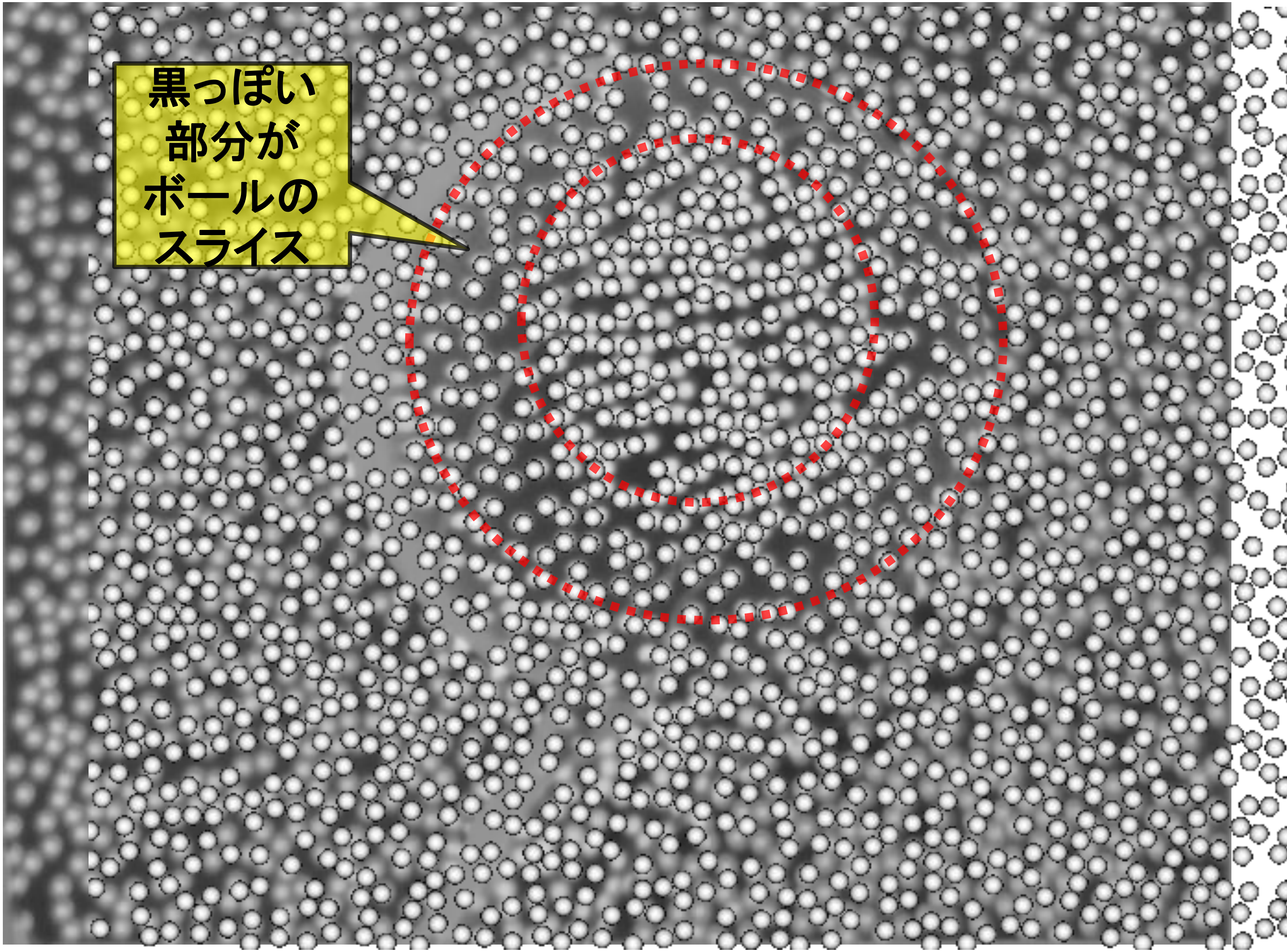




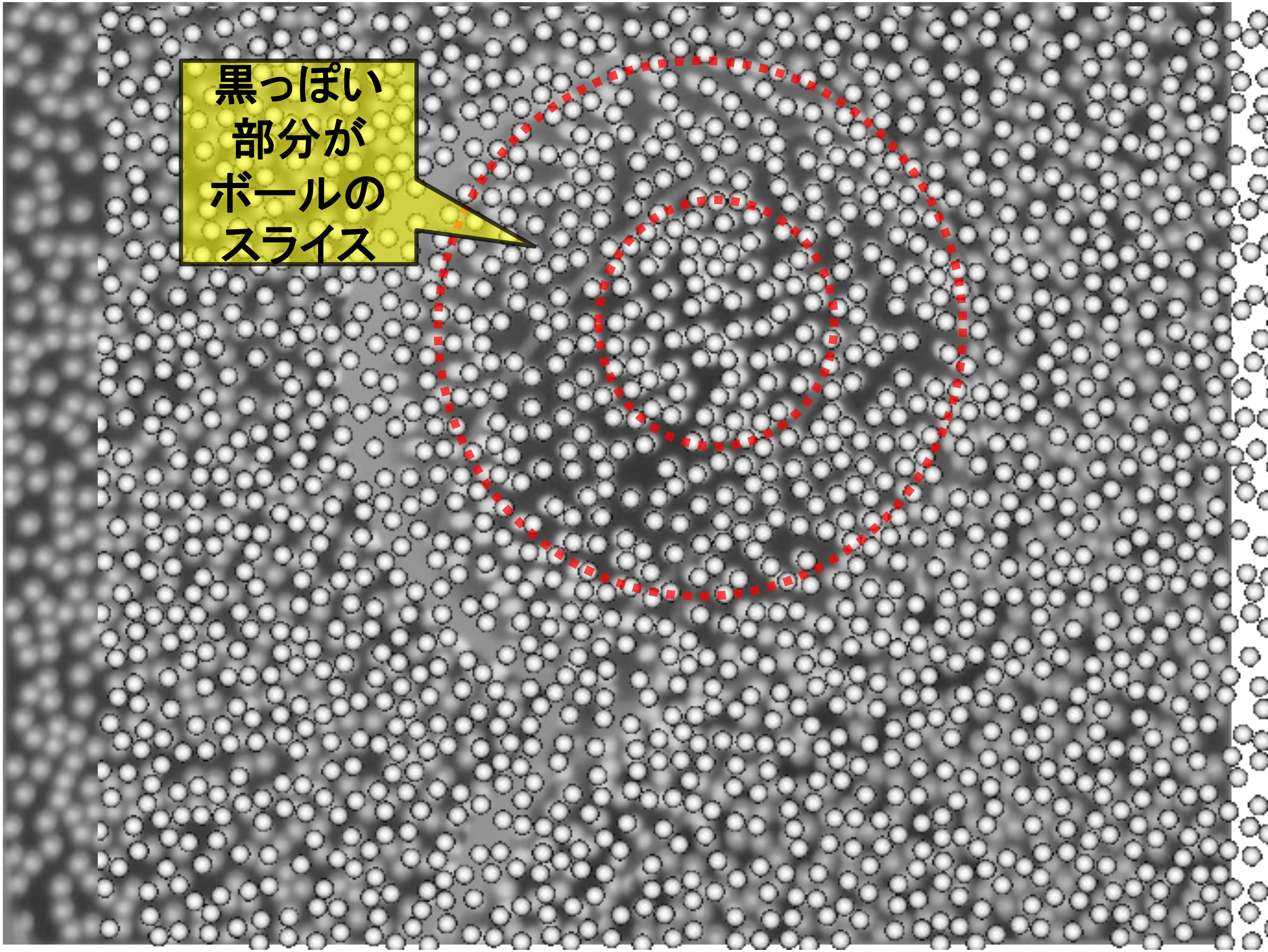
【手動シフトで再構成できることを確認】



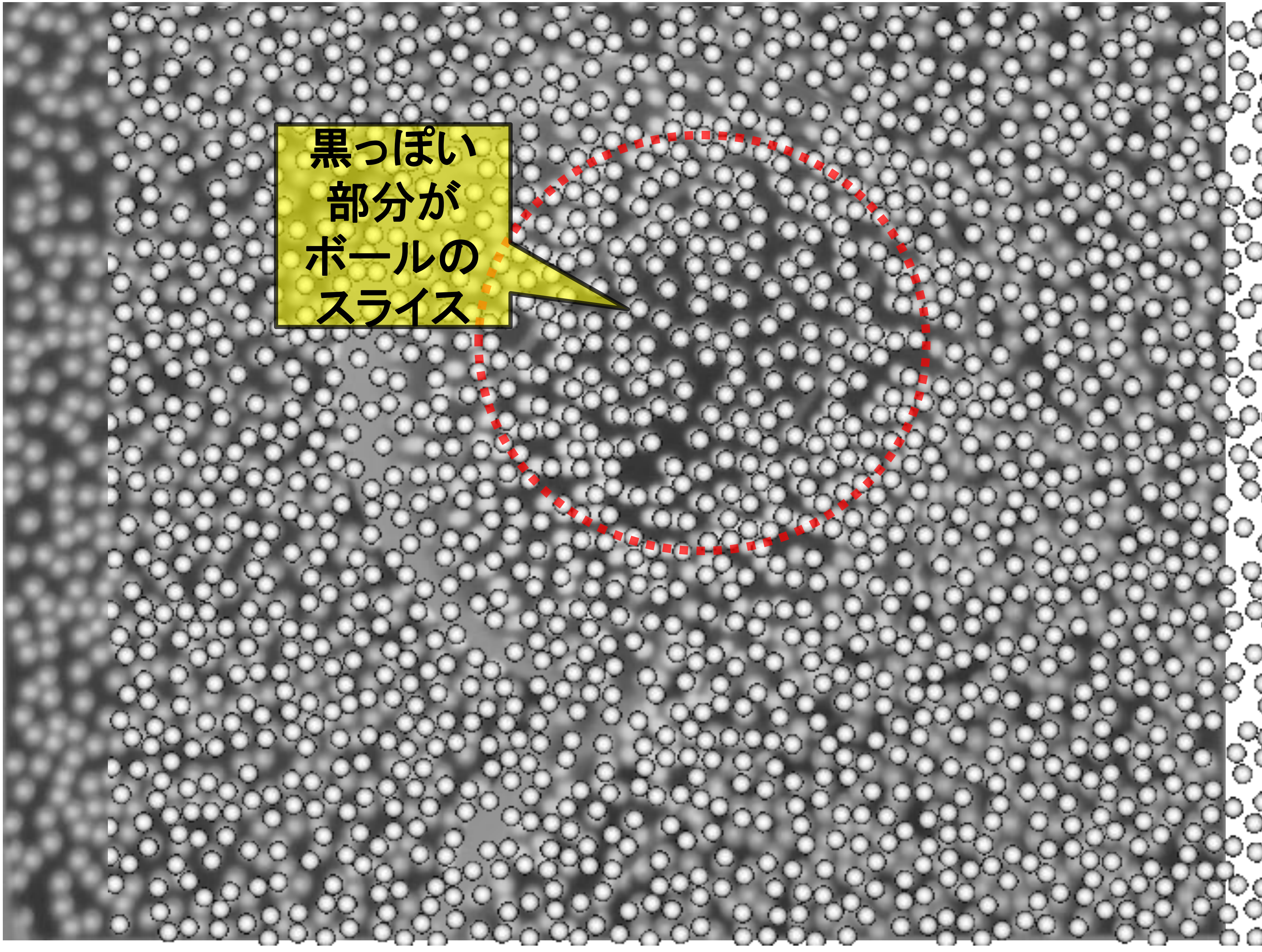
【手動シフトで再構成できることを確認】

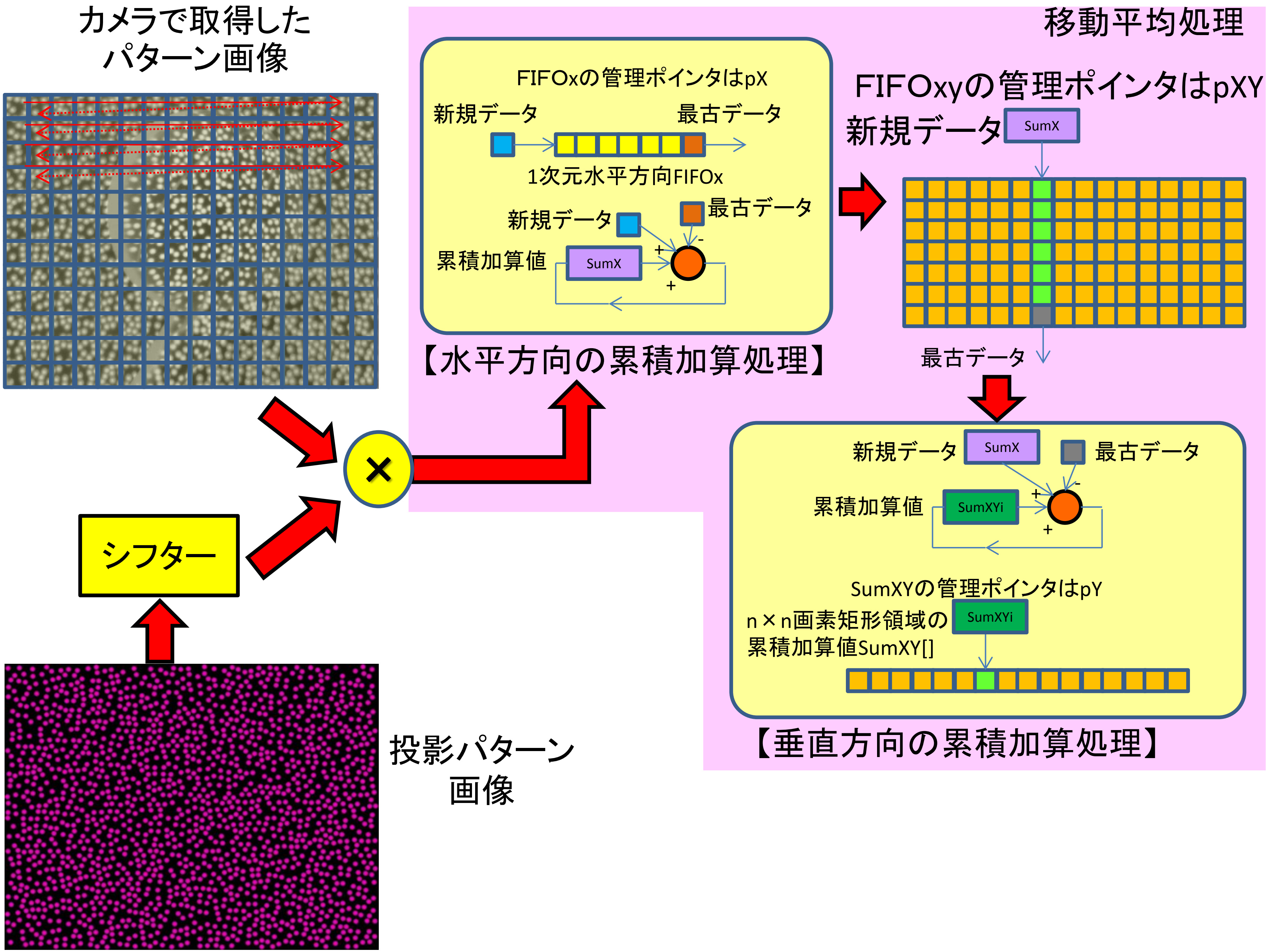


【手動シフトで再構成できることを確認】



【手動シフトで再構成できることを確認】




カメラで取得した
パターン画像
移動平均処理
FIFOxの管理ポインタはpX
新規データ
最古データ
1次元水平方向FIFOx
新規データ
最古データ
累積加算値
SumX
+
-
+
【水平方向の累積加算処理】
FIFOxyの管理ポインタはpXY
新規データ
SumX
最古データ
×
シフター
新規データ
SumX
最古データ
累積加算値
SumXYi
+
-
+
SumXYの管理ポインタはpY
n×n画素矩形領域の
累積加算値SumXY[]
SumXYi
【垂直方向の累積加算処理】
投影パターン
画像


Slice0.bmp
Slice1.bmp
Slice2.bmp
Slice3.bmp
Slice4.bmp
Slice5.bmp
Slice6.bmp
Slice7.bmp
Slice8.bmp
Slice9.bmp
Slice10.bmp
Slice11.bmp
Slice12.bmp
Slice13.bmp
Slice14.bmp
Slice15.bmp


Slice16.bmp
Slice17.bmp
Slice18.bmp
Slice19.bmp
Slice20.bmp
Slice21.bmp
Slice22.bmp
Slice23.bmp
Slice24.bmp
Slice25.bmp
Slice26.bmp
Slice27.bmp
Slice28.bmp
Slice29.bmp
Slice30.bmp
Slice31.bmp

Slice32.bmp

Slice33.bmp

Slice34.bmp

Slice35.bmp

Slice36.bmp

Slice37.bmp

Slice38.bmp

Slice39.bmp

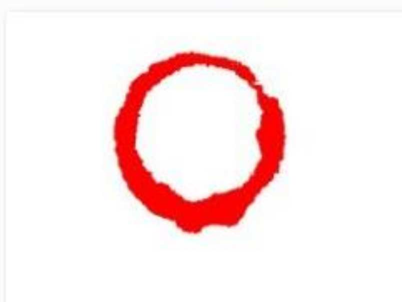
Slice40.bmp

Slice41.bmp

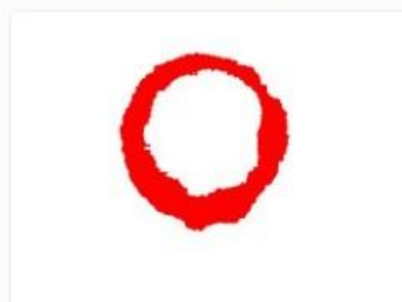
Slice42.bmp

Slice43.bmp

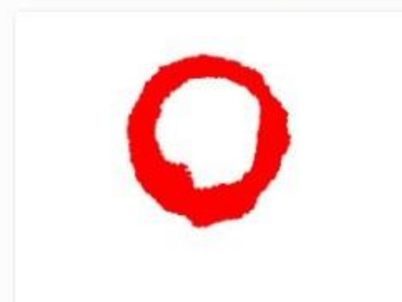
Slice44.bmp



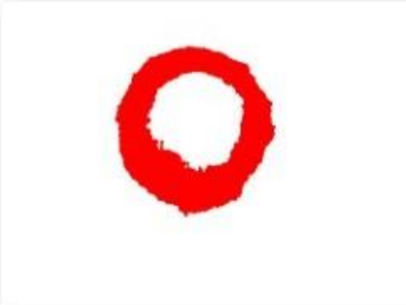
Slice45.bmp



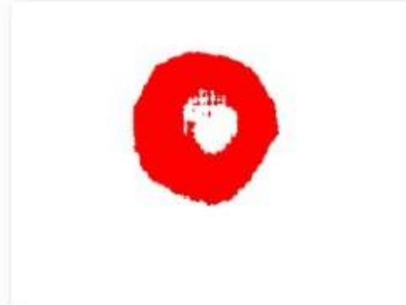
Slice46.bmp

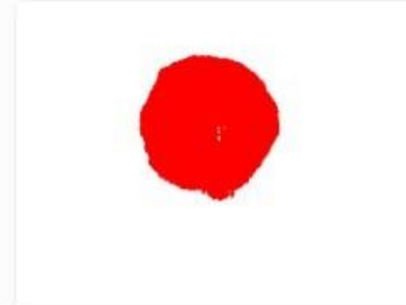


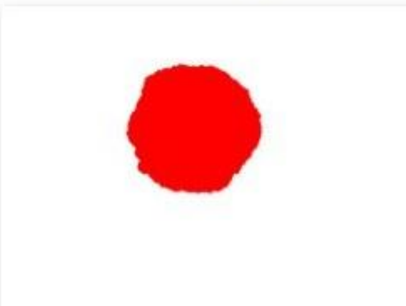
Slice47.bmp

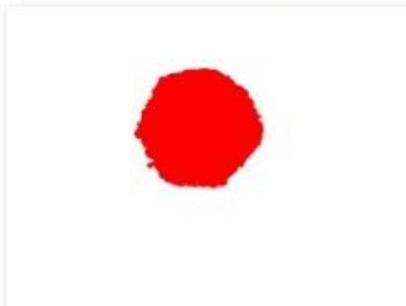

Slice48.bmp

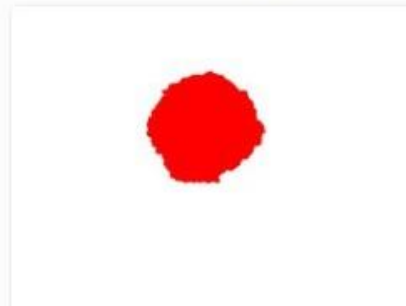

Slice49.bmp

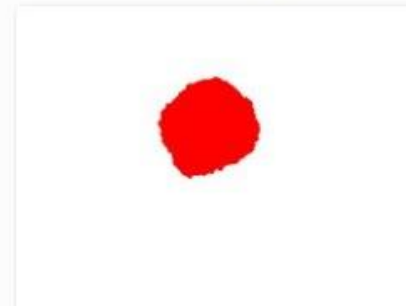

Slice50.bmp

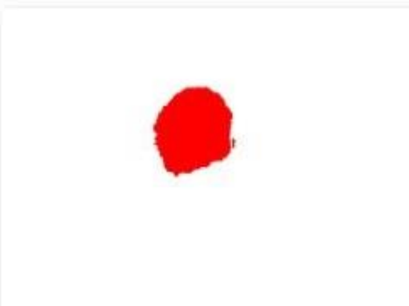

Slice51.bmp

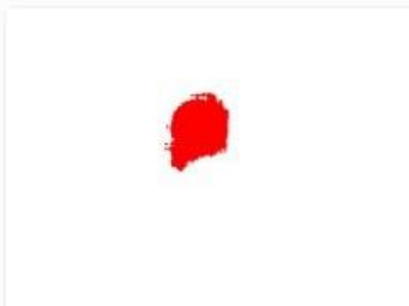

Slice52.bmp

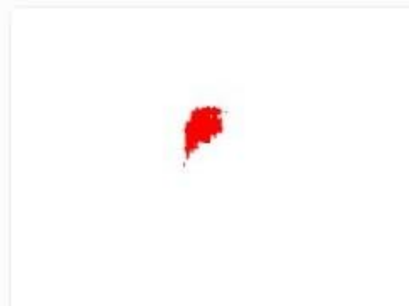

Slice53.bmp


Slice54.bmp

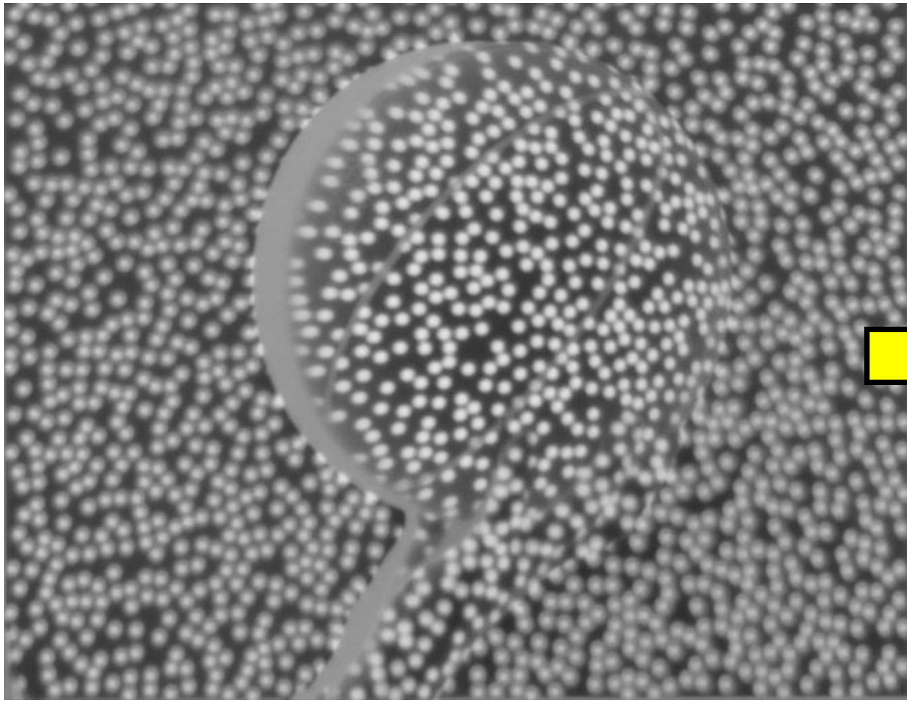

Slice55.bmp


Slice56.bmp

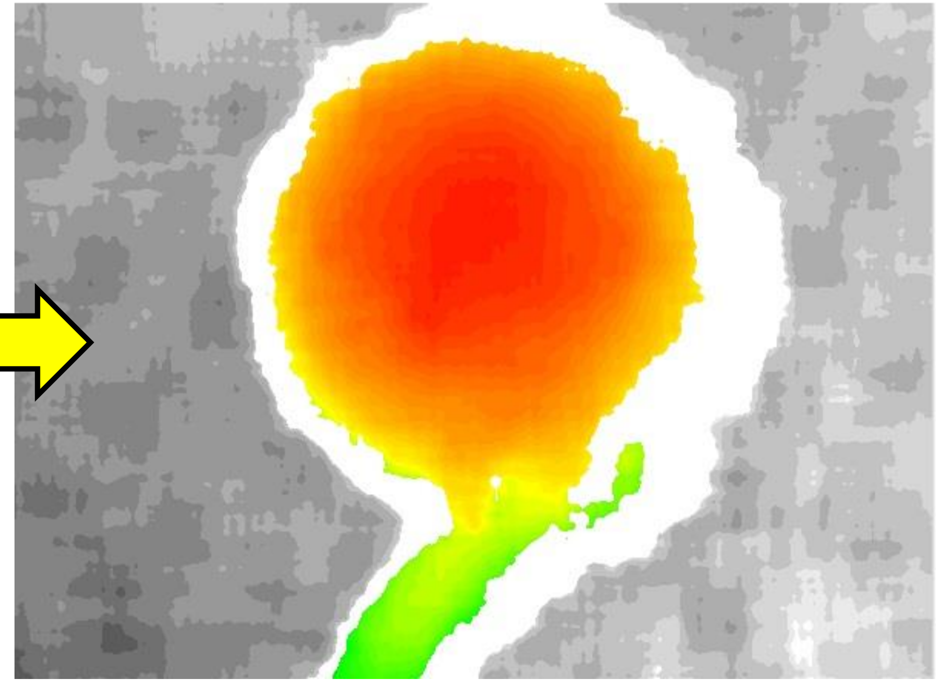

Slice57.bmp


Slice58.bmp

Slice59.bmp

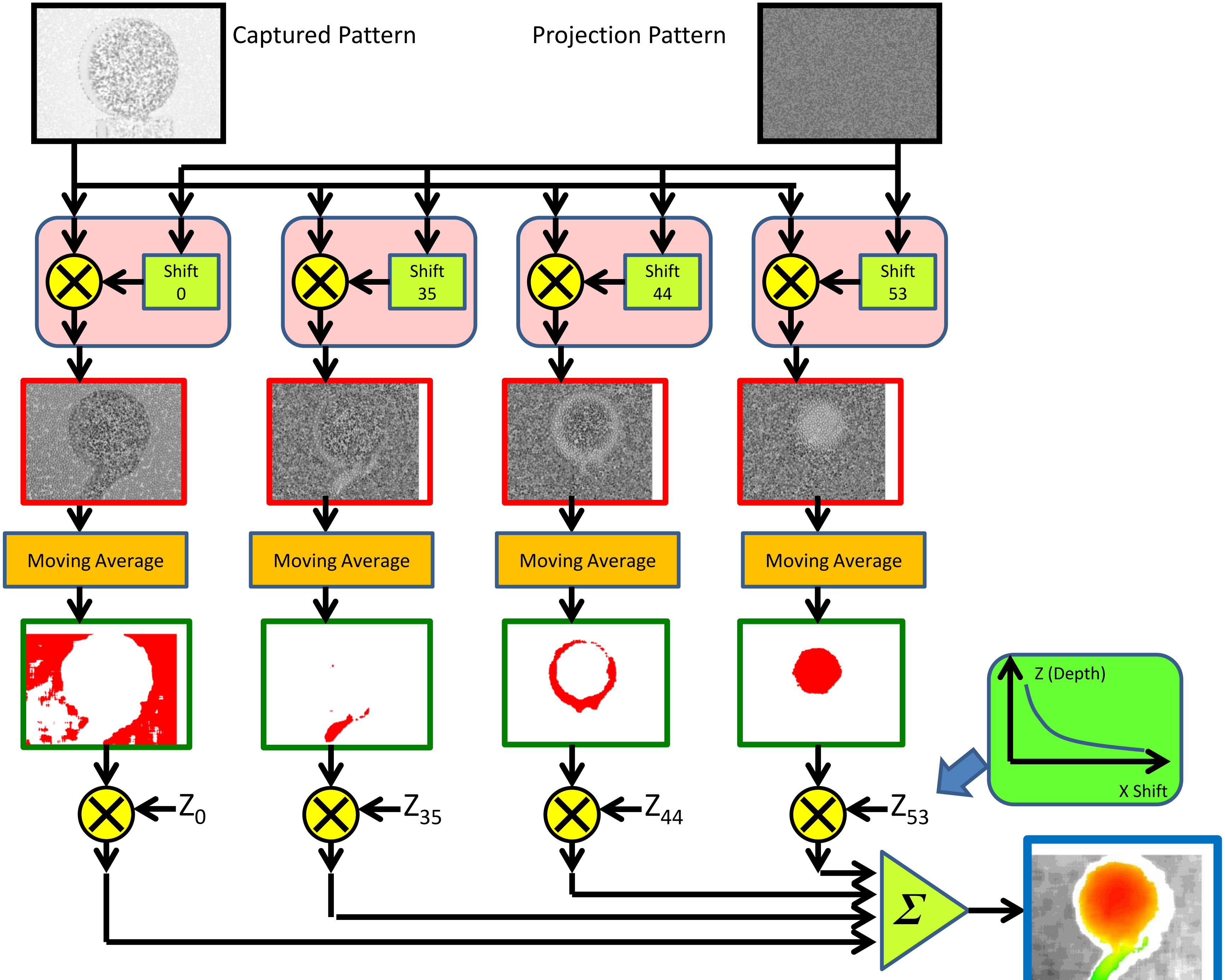


【撮影されたランダム・ドット・パターン】



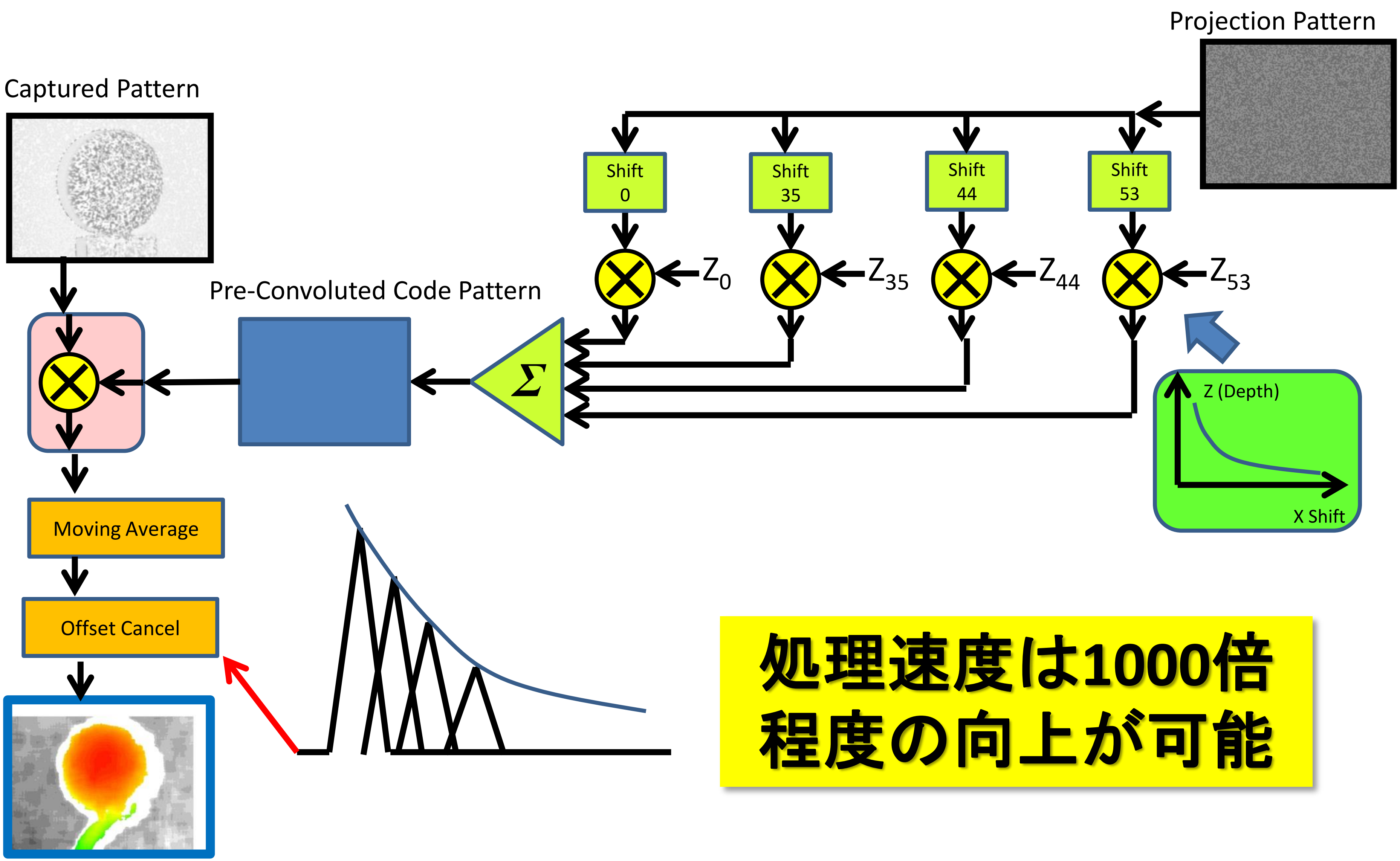
【水平シフト量のマップ】

ランダム・ドット・パターンとは、
ランダム(無秩序)という他にはない
規則性が存在するパターンのこと


Captured Pattern
Projection Pattern
Shift 0
Shift 35
Shift 44
Shift 53
Moving Average
Moving Average
Moving Average
Moving Average
Z (Depth)
X Shift
Z_0
Z_{35}
Z_{44}
Z_{53}
Σ

【超高速アルゴリズム】

Neo-Tech-Lab.com

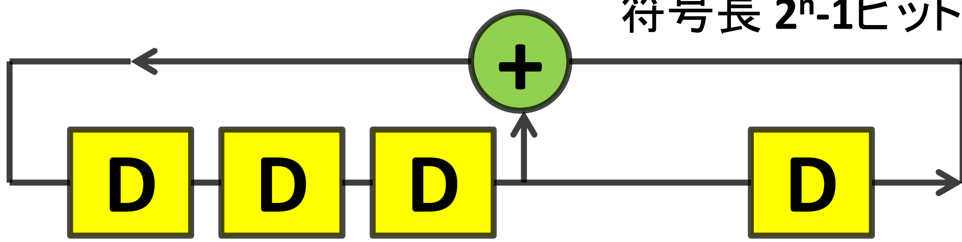


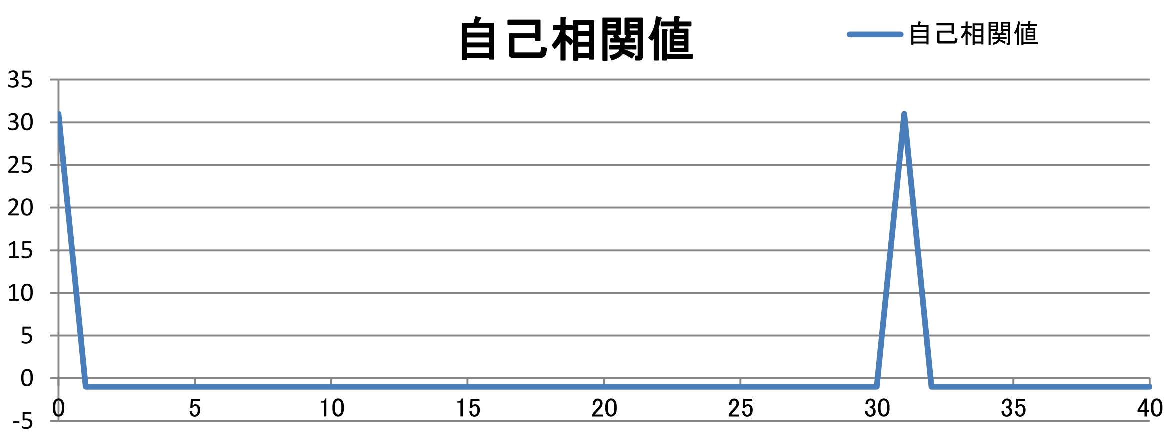
処理速度は1000倍程度の向上が可能

m系列符号発生器

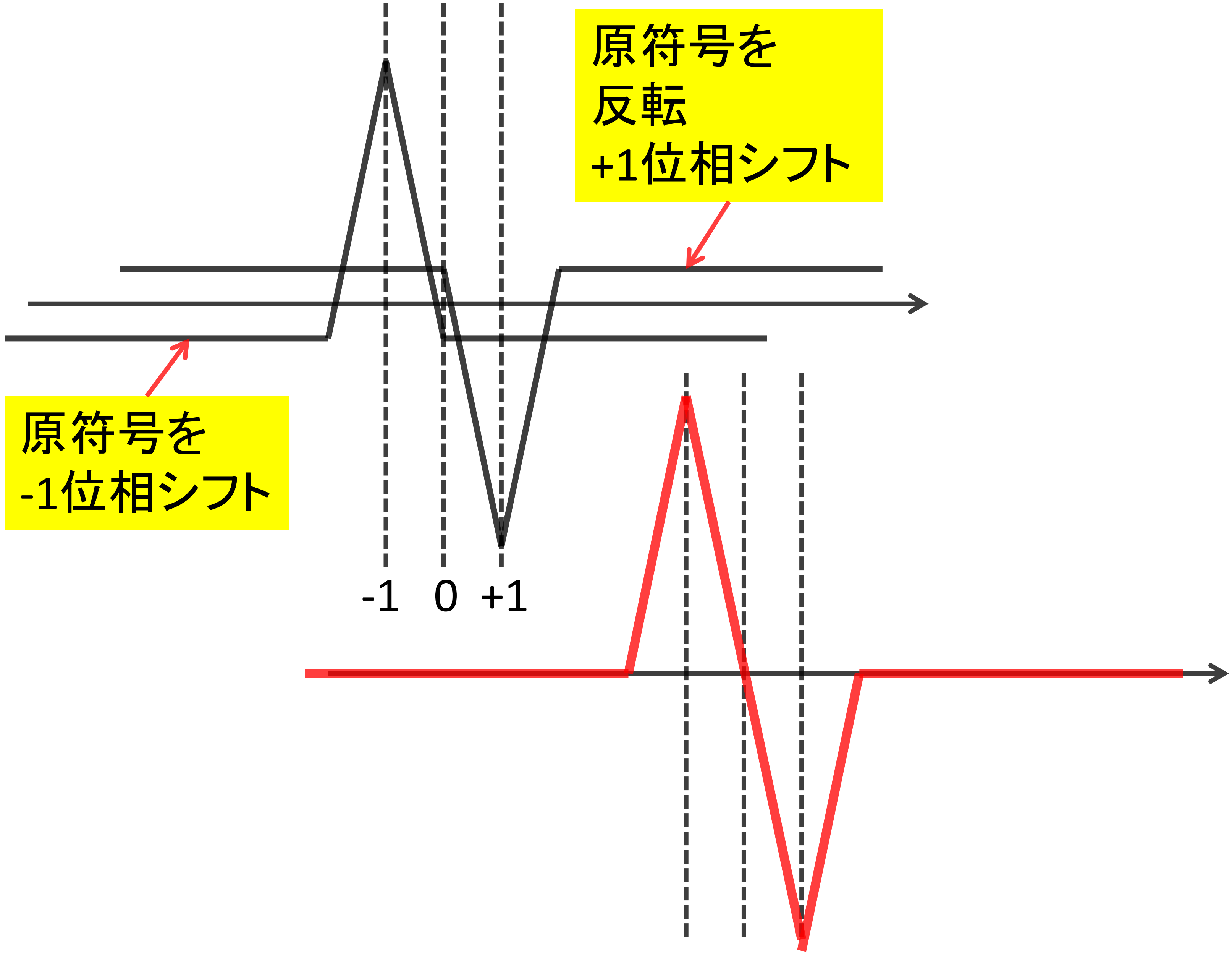
n個のレジスタ

符号長 2^n-1ビット長

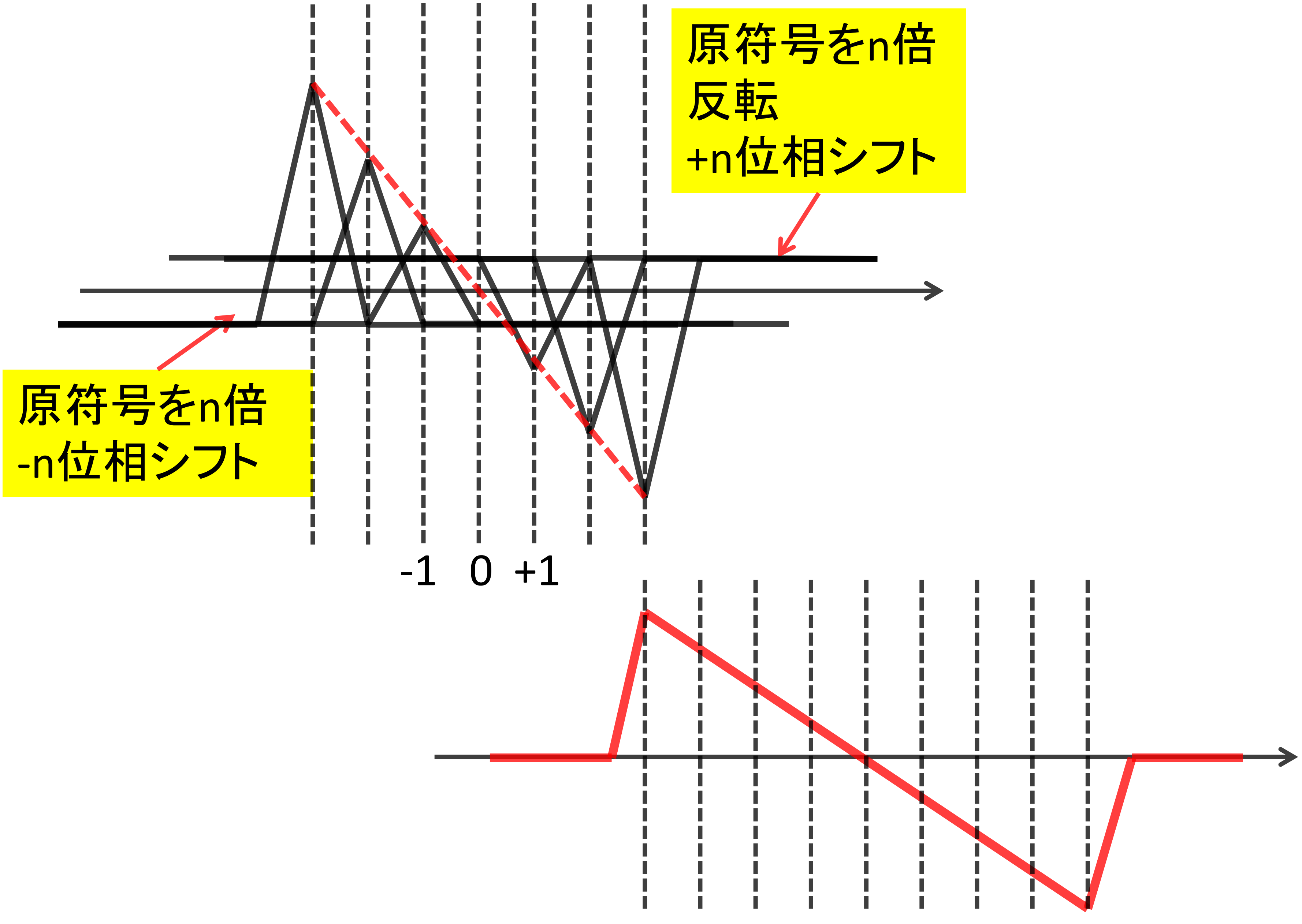


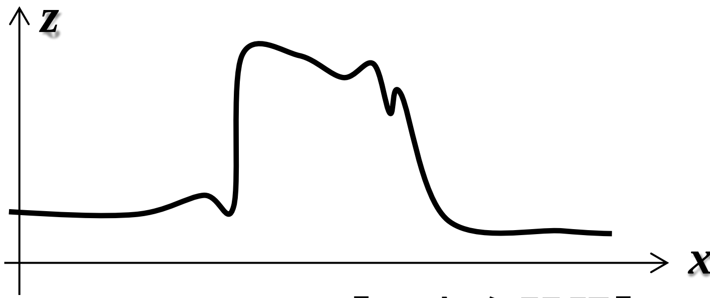


【符号の加算と相互相関】



【符号の加算と相互相関】





【順方向問題】

推定デプス値***z*** → シフト量***d*** → 推定投影パターン***O***
(影は0)

関数　関数

Affine Transformation
Texture Mapping

$$O_j = \sum_{i=1}^{m} \alpha_{ij} z_i$$

実測パターン S_j

部分誤差 $e_j = S_j - O_j$

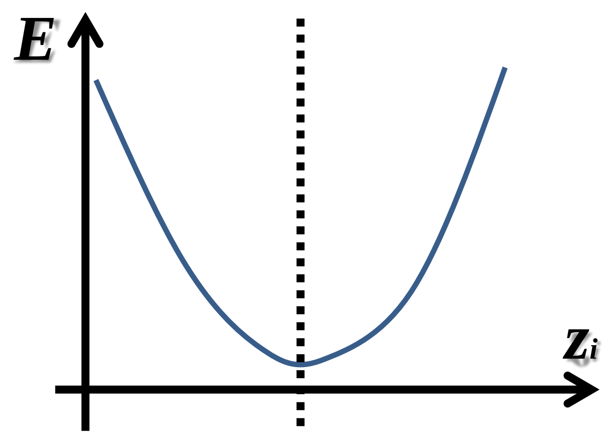
最小2乗法
評価関数E

$$E = \sum_{j=1}^{n} e_j^2 = \sum_{j=1}^{n} (S_j - O_j)^2$$

未知数***zi***を含まない部分 $S_j - O_j + \alpha_{ij} z_i$

未知数***zi***を含む部分 $-\alpha_{ij} z_i$

$$z_i = z_i + \frac{1}{\sum_{j=1}^{n} \alpha_{ij}^{2}} \cdot \sum_{j=1}^{n} \alpha_{ij} (S_j - O_j)^2$$



O_j　z_i

$$O_j = \sum_{i=1}^{m} \alpha_{ij} z_i$$

$$E=\sum_{j=1}^{n}e_j^2=\sum_{j=1}^{n}(S_j-O_j)^2=\sum_{j=1}^{n}\left\{(S_j-O_j+\alpha_{ij}z_i)-\alpha_{ij}z_i\right\}^2$$

$$E=z_i^2\sum_{j=1}^{n}\alpha_{ij}{}^2-2z_i\sum_{j=1}^{n}\alpha_{ij}(S_j-O_j+\alpha_{ij}z_i)+\sum_{j=1}^{n}(S_j-O_j+\alpha_{ij}z_i)^2$$

$$E=A_i^2z_i^2-2A_iB_iz_i+C_i=\left(A_iz_i-B_i\right)^2+C_i-B_i^2$$

★一般の投影パターンを既知のα_{ij}とする。目標とする水平シフト関数をS_jとすれば基底遷移アルゴリズムで、Pre-Convoluted Code Pattern z を求めることができる。

★実質的にde-convolutionと同じなのだが、連立方程式を解く方法では、ノイズを掃き集める結果となってしまう。基底遷移ではノイズは満遍なく平坦化される。

【まとめ】

①ランダムドットパターンによるデプスカメラアルゴリズムとその高速化手法について紹介、説明を行いました。

②精密距離測定で呼吸を、赤外線反射強度で脈波測定を行うことができます。

③処理の高速化によって、Windows7や8でなくてもデプス画像が得られることで、今後組込応用を行う予定です。

- ●距離情報を音に変換するCyber Eye
- ●バイタルを見守るシステム

④Skeleton TrackingやPolygon Fittingに関してもオリジナル・アルゴリズムを開発する予定です。

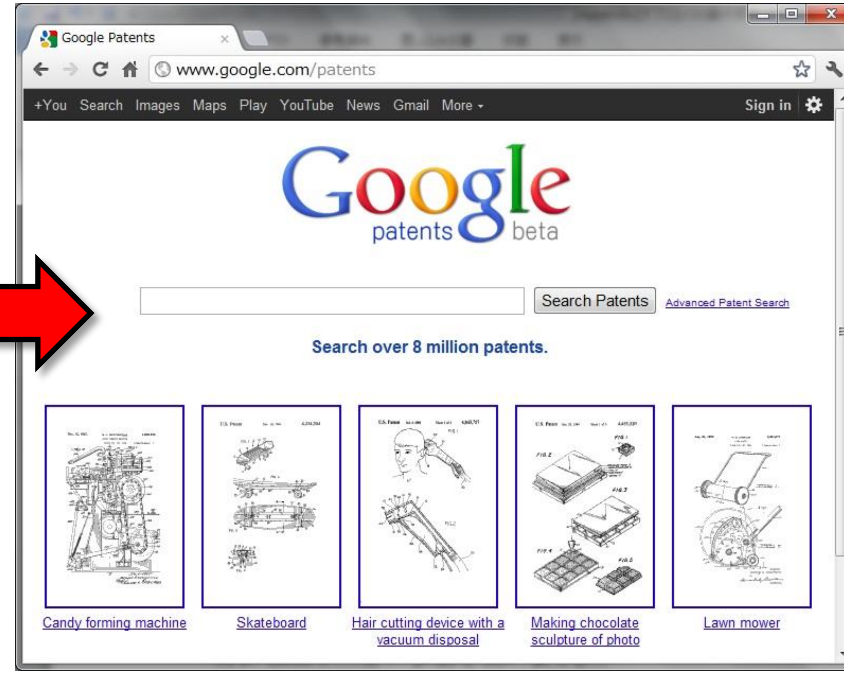
【特許出願明細書の調査方法】

Neo-Tech-Lab.com

イスラエルのPrime Sense社の出願を調べる

①米国特許庁で出願番号を調べる

②GoogleでPDFを取得する



【米国特許出願明細書】

US20100118123

【請求項】22-24, 46-48, 49-50, 51-52

【取下げ】1-21, 25-45

【取下げ】

【要素に複数のマイクロレンズを含む】

【付記】
米国特許出願明細書
US20100118123

Neo-Tech-Lab.com

1-21. (canceled)

22. Apparatus for mapping an object, comprising:

an illumination assembly, comprising:

a transparency containing a plurality of micro-lenses arranged in a non-uniform pattern; and

a light source, which is configured to transilluminate the transparency with optical radiation so as to project the pattern onto the object;

an image capture assembly, which is configured to capture an image of the pattern that is projected onto the object using the transparency; and

a processor, which is coupled to process the image captured by the image capture assembly so as to reconstruct a three-dimensional (3D) map of the object.

23. The apparatus according to claim **22**, wherein the micro-lenses are configured to focus the optical radiation to form respective focal spots at a focal plane in the non-uniform pattern, and wherein the light source comprises optics for projecting the non-uniform pattern of the focal spots from the focal plane onto the object.

24. The apparatus according to claim **22**, wherein at least some of the micro-lenses have non-uniform focal lengths, and wherein the light source comprises optics for projecting the non-uniform pattern of the focal spots so that the pattern that is projected on the object varies with distance from the illumination assembly.

Neo-Tech-Lab.com

【取下げ】

【要素に複数のマイクロレンズを含む】

25-45. (canceled)

46. A method for mapping an object, comprising:

transilluminating a transparency containing a plurality of micro-lenses arranged in a non-uniform pattern so as to project the non-uniform pattern onto the object;

capturing an image of the non-uniform pattern that is projected onto the object; and

processing the captured image so as to reconstruct a three-dimensional (3D) map of the object.

47. The method according to claim **46**, wherein the micro-lenses are configured to focus the optical radiation to form respective focal spots at a focal plane in the non-uniform pattern, and wherein transilluminating the transparency comprises projecting the non-uniform pattern of the focal spots from the focal plane onto the object.

48. The method according to claim **46**, wherein at least some of the micro-lenses have non-uniform focal lengths, and wherein transilluminating the transparency comprises projecting the non-uniform pattern of the focal spots so that the pattern that is projected on the object varies with distance from the transparency.

【付記】

米国特許出願明細書

US20100118123

【要素に複数のマイクロレンズを含む】

49 Apparatus for mapping an object, comprising:

an illumination assembly, comprising:

a diffuser;

a light source, which is configured to transilluminate the diffuser with optical radiation;

a transparency containing an array of micro-lenses, which are arranged to focus the optical radiation transmitted through the diffuser, thereby generating a pattern of spots; and

projection optics, which are arranged to project the pattern onto the object;

an image capture assembly, which is configured to capture an image of the pattern that is projected onto the object using the transparency; and

a processor, which is coupled to process the image captured by the image capture assembly so as to reconstruct a three-dimensional (3D) map of the object.

50. The apparatus according to claim **49**, wherein the illumination assembly is configured to project the pattern so that the pattern varies with distance from the illumination assembly.

【付記】
米国特許出願明細書
US20100118123

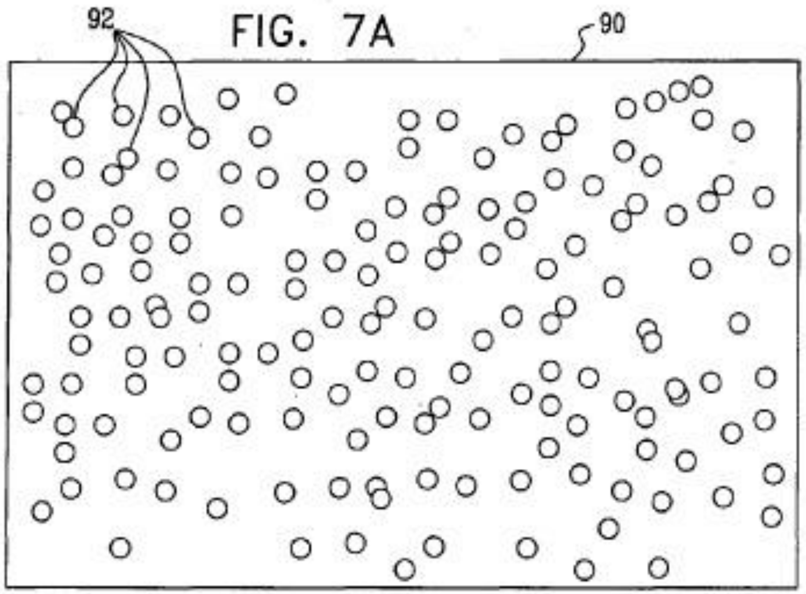
【要素に複数のマイクロレンズを含む】

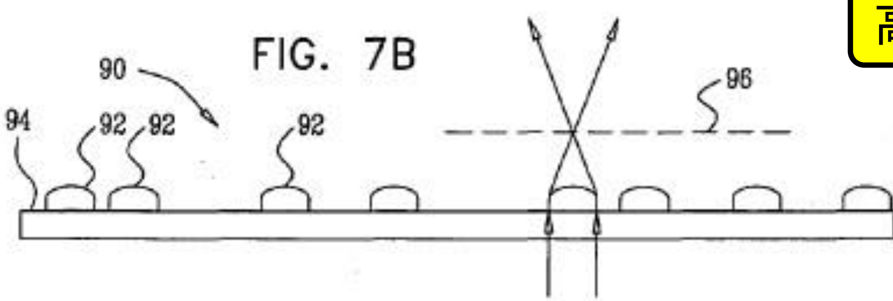
51. A method for mapping an object, comprising:
transilluminating a diffuser with optical radiation;
focusing the optical radiation transmitted through the diffuser using an array of micro-lenses, thereby generating a pattern of spots;
projecting the pattern onto the object;
capturing an image of the pattern that is projected onto the object; and
processing the captured image so as to reconstruct a three-dimensional (3D) map of the object.

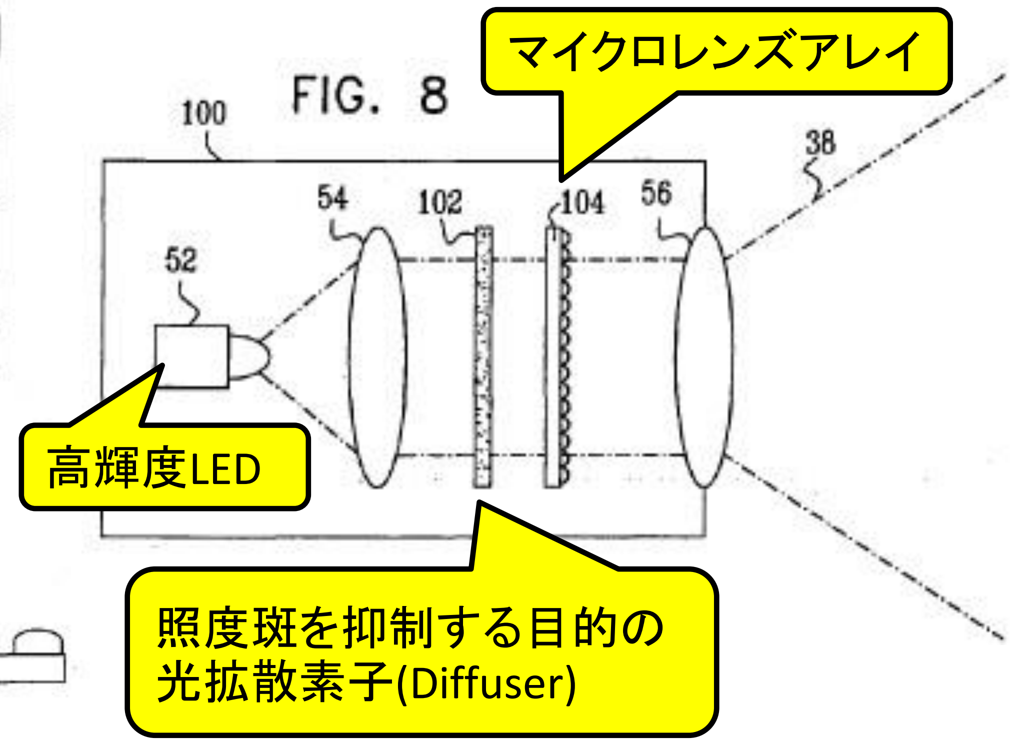
52. The method according to claim **51**, wherein the projected pattern varies with distance from the array of micro-lenses.

【付記】
米国特許出願明細書
US20100118123

【Prime Sense社のマイクロレンズアレイ】





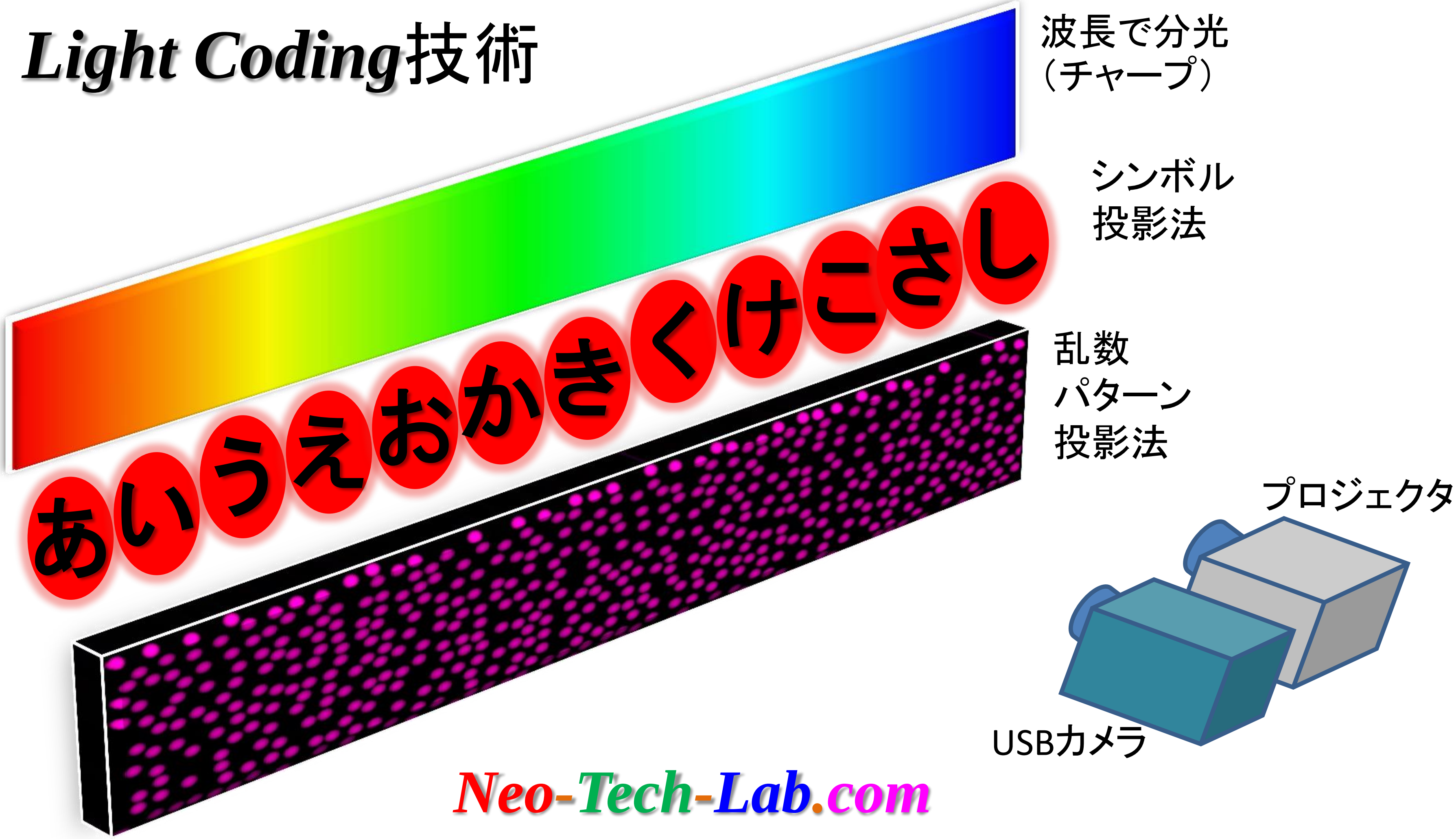


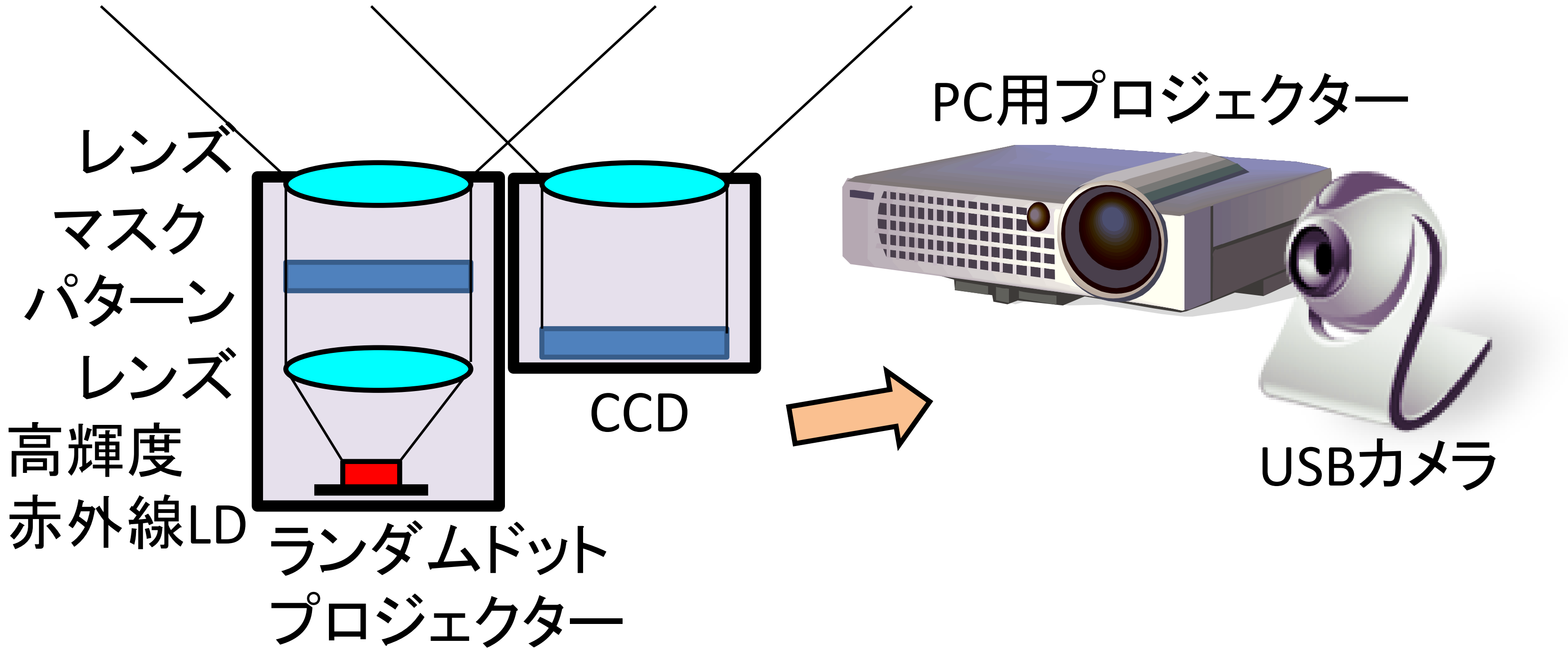
①【マイクロレンズアレイ】　　②【プロジェクタ】

【付記】米国特許出願明細書US20100118123の図7、図8

Neo-Tech-Lab.com

*Light Coding*技術

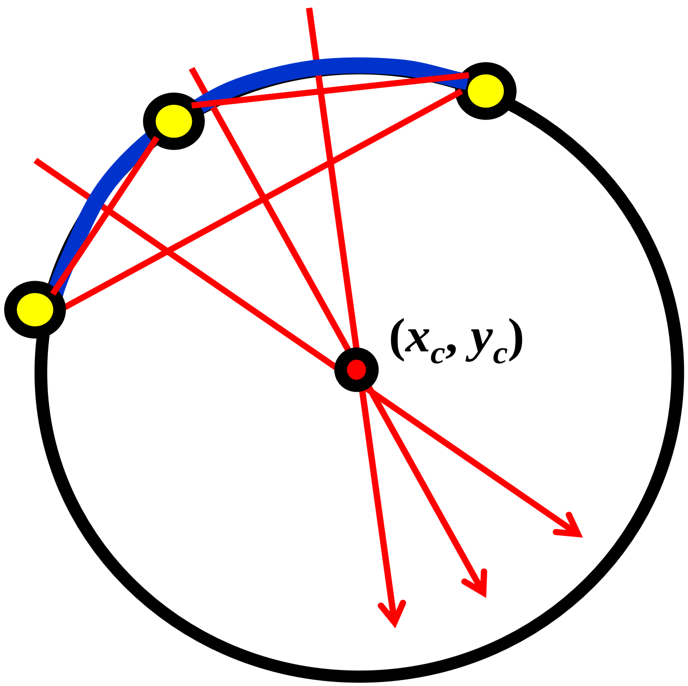




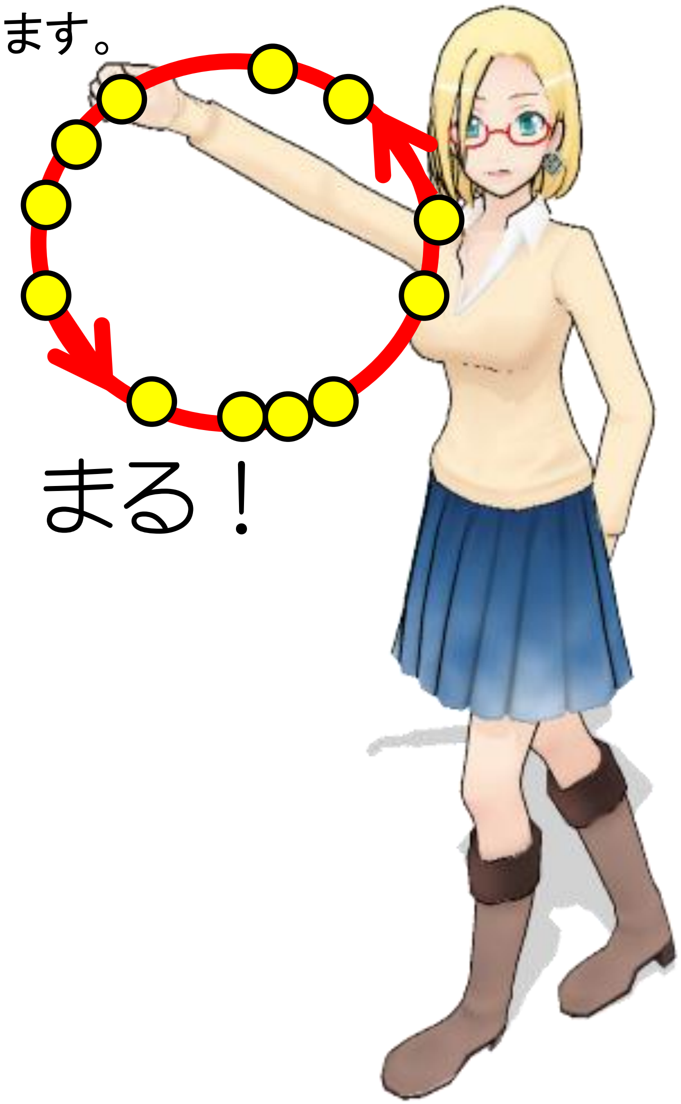
【図3.1】デプス・カメラの構造と動作原理実証用装置

【Kinectアプリケーション事例】Cyber Sign

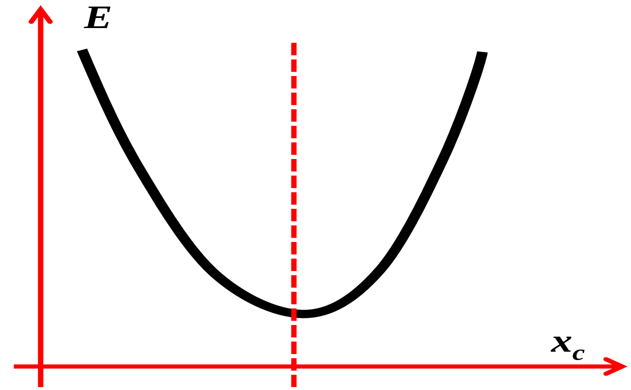
　人物の手の動きの履歴残像をシステムに対するサインとして使うデモプログラムを紹介します。人物が音声認識で指定した手で宙に直線や円、円弧を描くと、1秒間の残像から円の中心座標と半径を求め、半径が大きければ、直線、半径が小さければ円として最小二乗法で近似を行います。直線の場合には履歴残像に移動速度と慣性をつけて、ボールを飛ばすように離れたコマンド・ボタンを押すことができます。



【図２】円または円弧の中心座標(Xc,Yc)を推定する理論の説明図



$$E=\sum_{j=1}^{n}\frac{\left(\overbrace{a_jx_c}^{\text{変数}x_c\text{を含む部分}}+\overbrace{b_jy_c+c_j}^{\text{変数}x_c\text{を含まない部分}}\right)^2}{a_j^{\,2}+b_j^{\,2}}$$



$$x_c=-\frac{B}{A}=-\frac{AB}{A^2}$$

【図４】評価関数は放物線

ここで、

$$O_j=a_jx_c+b_jy_c+c_j=\boxed{a_jx_c}+\boxed{\left(O_j-a_jx_c\right)}$$

と書き換えると、誤差評価関数Eは次式のように整理されます。

$$E=x_c^{\,2}\sum_{j=1}^{n}\frac{a_j^{\,2}}{a_j^{\,2}+b_j^{\,2}}+2x_c\sum_{j=1}^{n}\frac{a_j\left(O_j-a_jx_c\right)}{a_j^{\,2}+b_j^{\,2}}+\sum_{j=1}^{n}\frac{\left(O_j-a_jx_c\right)^2}{a_j^{\,2}+b_j^{\,2}}$$

変数x_c以外の部分をわかりやすく以下のように記号で表記します。

$$A^2=\boxed{\sum_{j=1}^{n}\frac{a_j^{\,2}}{a_j^{\,2}+b_j^{\,2}}}\qquad AB=\boxed{\sum_{j=1}^{n}\frac{a_j\left(O_j-a_jx_c\right)}{a_j^{\,2}+b_j^{\,2}}}\qquad C=\boxed{\sum_{j=1}^{n}\frac{\left(O_j-a_jx_c\right)^2}{a_j^{\,2}+b_j^{\,2}}}$$

すると、関数Eは変数x_c関して放物線だとわかります。

$$E=A^2x_c^{\,2}+2ABx_c+C=\underbrace{\left(Ax_c+B\right)}_{\text{放物線の軸に関係する部分}}{}^2+C-B^2$$

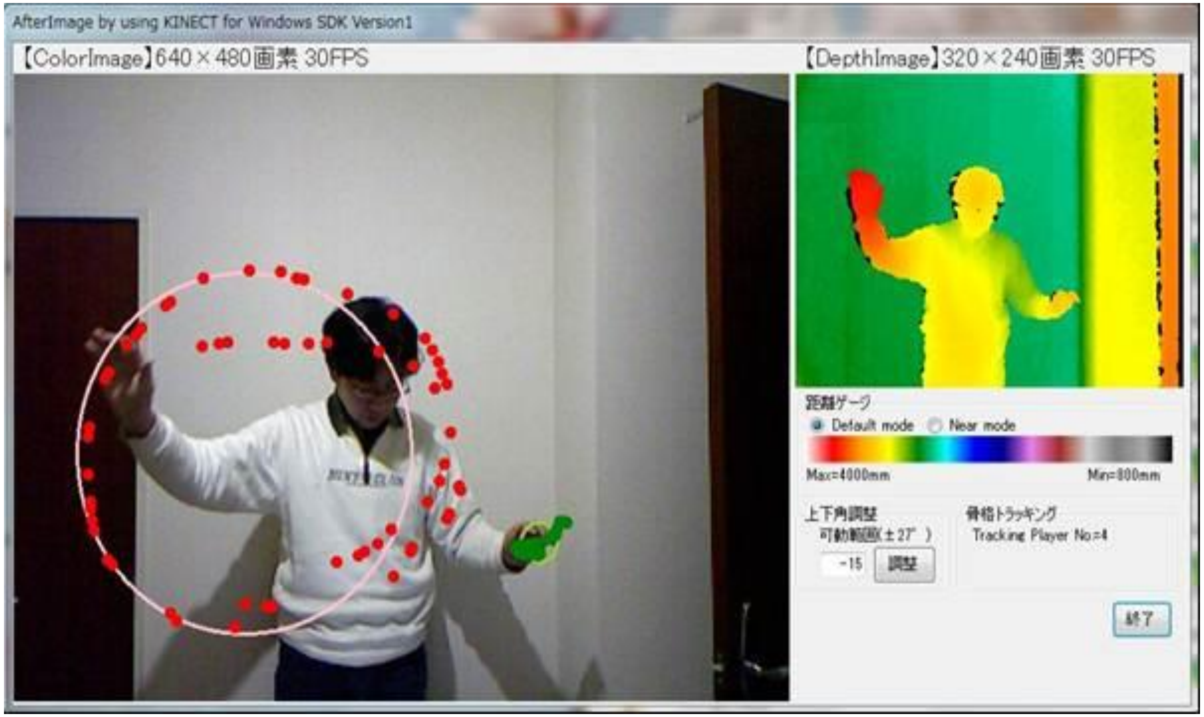
放物線は図4に示されるように、
軸x_c＝－B/Aで最小値C－B^2の値になります。
つまり、変数xcを軸値に変更すれば、誤差Eは最小になるわけです。

$$x_c = -\frac{B}{A} = -\frac{AB}{A^2} = -\frac{\sum_{j=1}^{n} \frac{a_j\left(O_j - a_j x_c\right)}{a_j^{\,2} + b_j^{\,2}}}{\sum_{j=1}^{n} \frac{a_j^{\,2}}{a_j^{\,2} + b_j^{\,2}}} = x_c - \frac{\sum_{j=1}^{n} \frac{a_j O_j}{a_j^{\,2} + b_j^{\,2}}}{\sum_{j=1}^{n} \frac{a_j^{\,2}}{a_j^{\,2} + b_j^{\,2}}}$$

同様に、未知数x_cを固定して未知数y_cを変数として扱えば、

$$y_c = y_c - \frac{\sum_{j=1}^{n} \frac{b_j O_j}{a_j^{\,2} + b_j^{\,2}}}{\sum_{j=1}^{n} \frac{b_j^{\,2}}{a_j^{\,2} + b_j^{\,2}}}$$

が得られます。



【Kinectの応用】

【デプスカメラ】
- ●AR楽器　ドラム、ギターがなくても演奏できる
- ●学習支援システム　英語をはじめとする言語学習の支援
- ●防犯システム　遮光式と異なり、ランダム・ドット・パターンで広域をカバーする

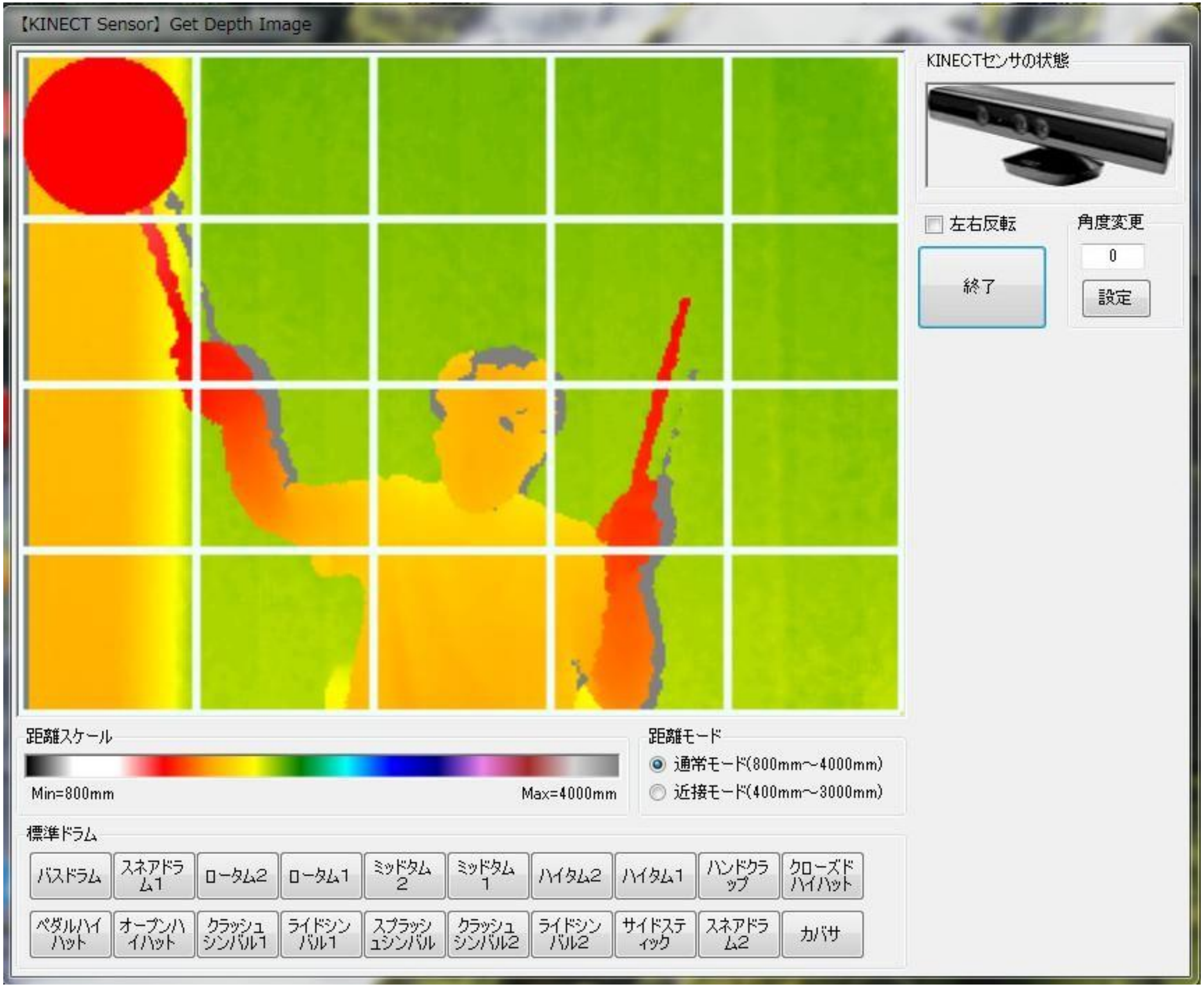
【デプスカメラ⇒立体音響】
- ●視覚障害者向け知覚コンバータ　Cyber Eye
  デプス・カメラで得た３次元情報を３次元立体音響に変換し聴覚で見る
  (Keywords: バイノーラル録音、頭部インパルス応答、Holophonics)
- ●健常者向け知覚コンバータ
  死角を無くす。（後方から接近する危険を察知）
- ●自動車用知覚コンバータ

【フェース・トラッキング】
- ●人工声帯　Cyborg Vocal Band　喉頭がんで声帯を無くした人向け
- ●携帯電話　脳梗塞早期診断、３D写真撮影、プライバシー保護(画像差し替え)

【乱数の性質を使った計測技術】
- ●センサ１個で3次元座標を計測
  携帯のマイク１個で超音波断層撮影。肝硬変やポリープの診断機能。
- ●センサの超高感度化を達成する
  例：磁気抵抗素子(MR)センサで心磁(0.1fT～150pT)を計測。虚血性心疾患の早期診断等。

【音の拡張現実】

●Kinectで楽器を構成する



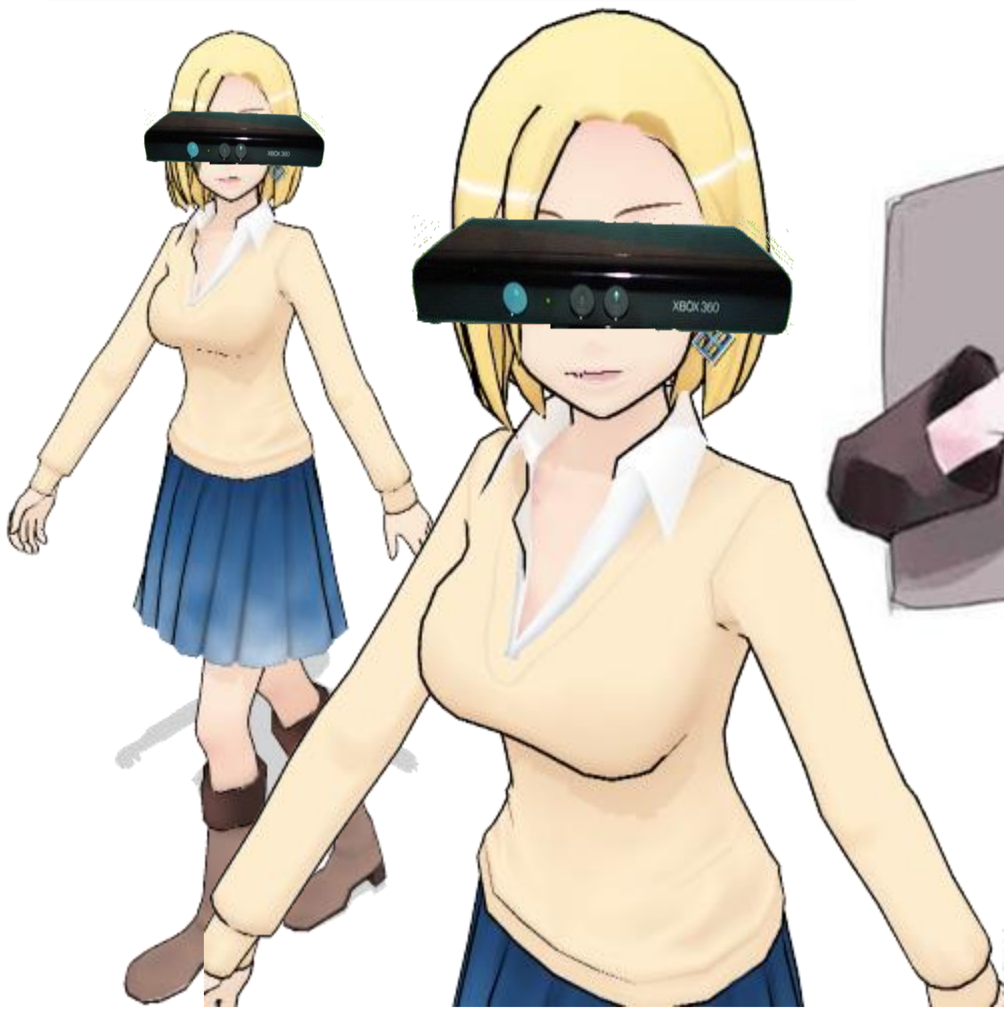
【Kinectを自作するプロジェクト】
ランダムドットパターンを投影する
プロジェクタを製作

【Kinectの小型・低価格化】

【Cyber Eyes】

Neo-Tech-Lab.com

深度情報を音に変換する知覚コンバータ

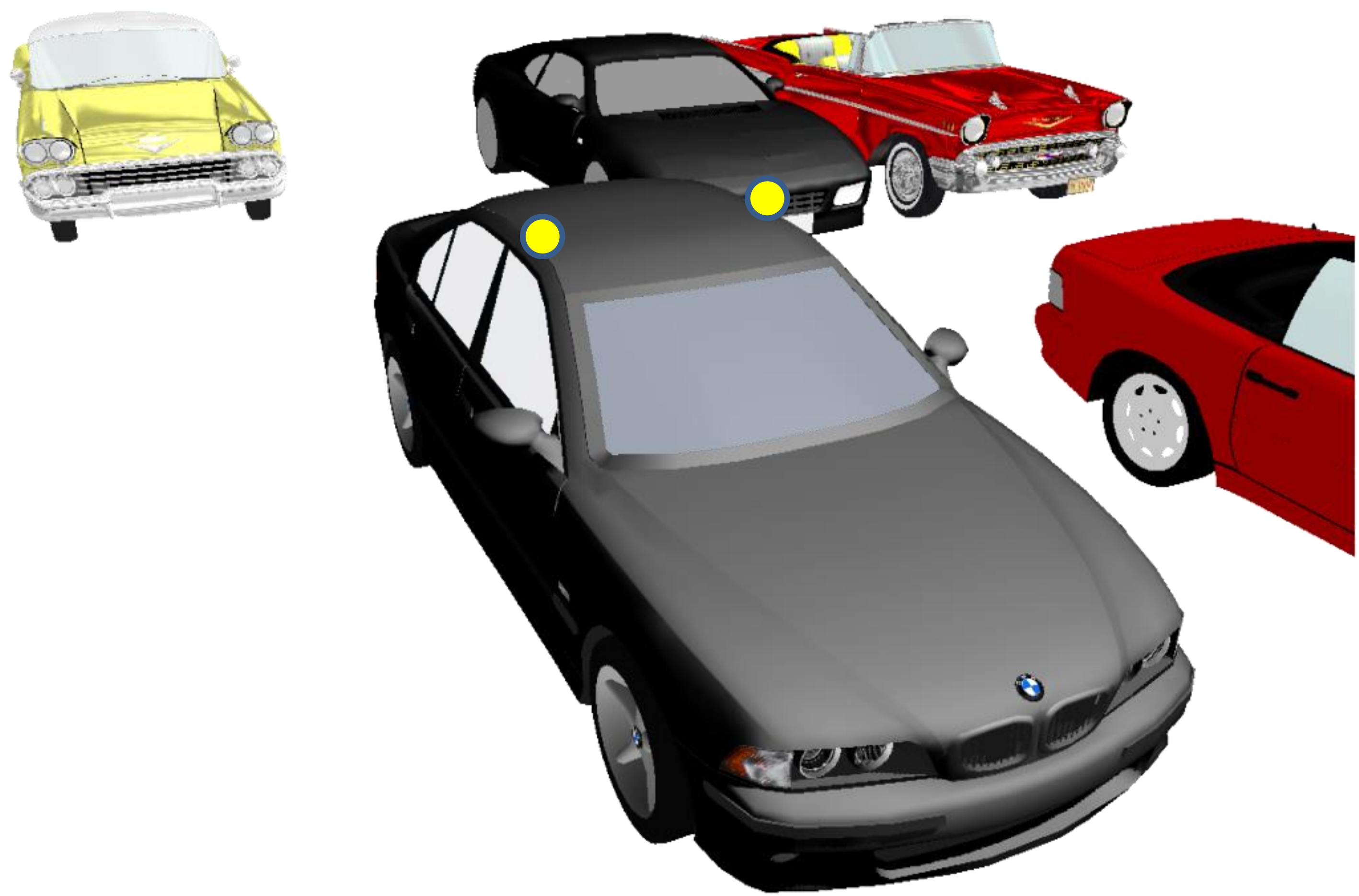


絵　たかはる画伯

【navigation】

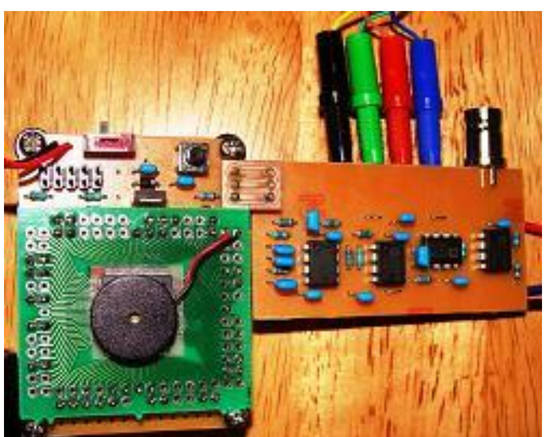
●運転手の死角の物体の存在を音で知らせる。

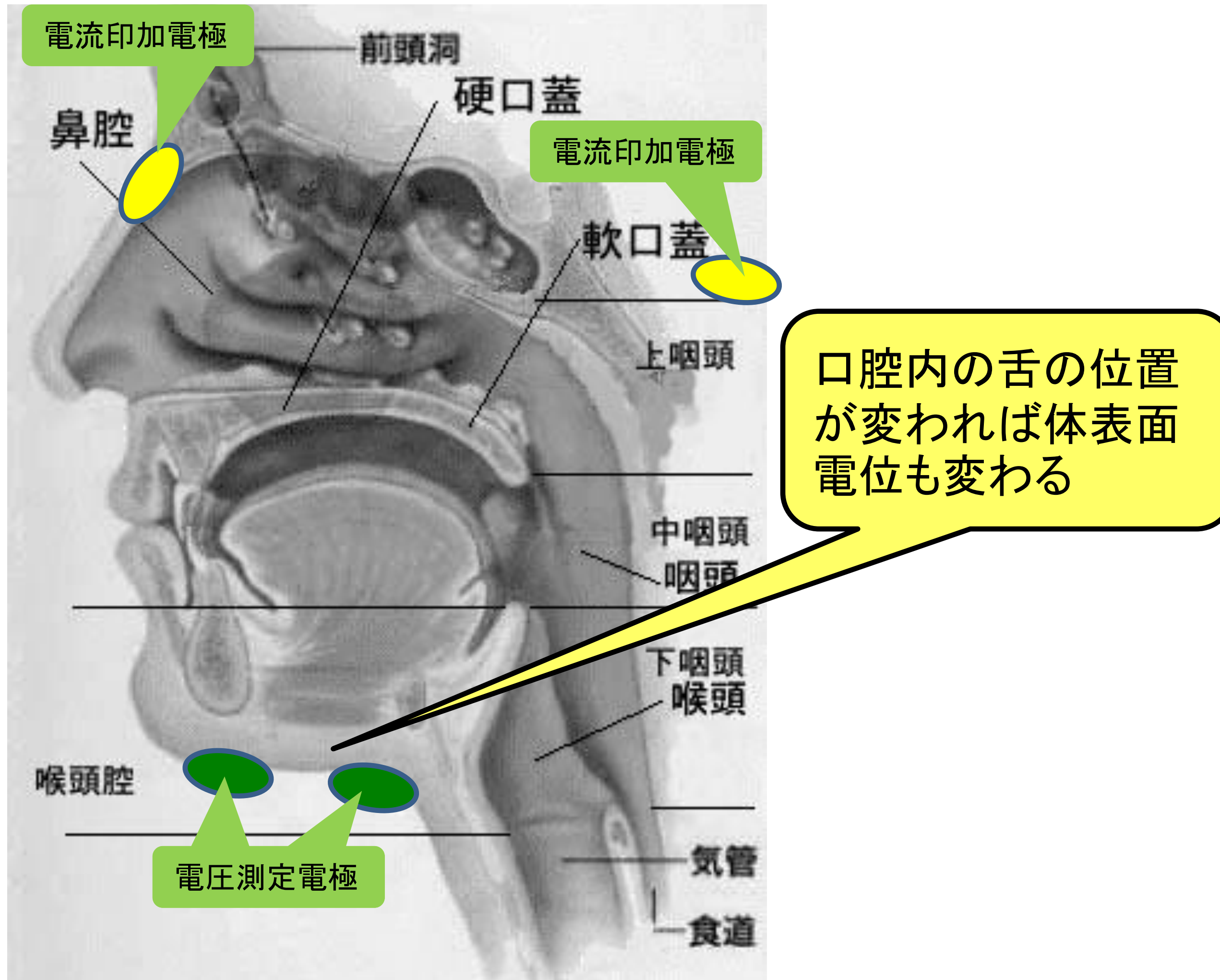
Holophonics(立体音響)



【人工声帯】

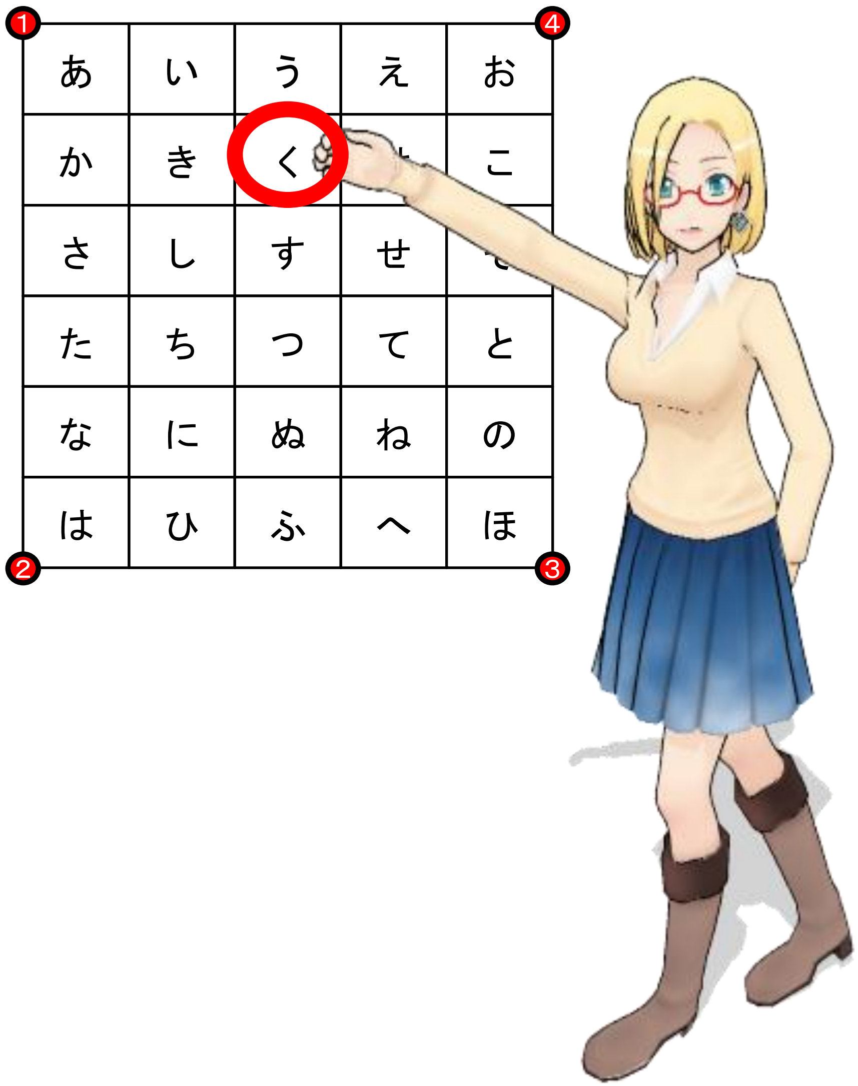
●Face Trackingとインピーダンス計測の組み合わせ





【Kinectアプリケーション事例】 Cyber Board

人物が指し示す表の位置に合わせて文字を発音したり、登録された.wavファイルを再生します。教育や介護等の目的で利用することができます。



【応用】

●アルファベット、基本英会話、100マス計算等にも応用可能。

●文字だけでなく、シンボルに置き換えて、意思疎通のツールに使うこともできます。介護や案内板、メニュー選択のツールとしてあるいはBGM playerとしてご利用できます。

【使い方】

●表の大きさは骨格抽出と音声認識で4角を登録。

●使う手も音声認識で左右を指定。

●0.5秒間同じ場所に手をかざすと発音。

【ノイズを使い広帯域で測定してセンサ感度を増倍】

$$C = W \log_2\left(1 + \frac{S}{N}\right)$$

C:通信容量[bps], **W**:帯域幅[Hz],
S:送信電力[W], **N**:ノイズ電力[W]

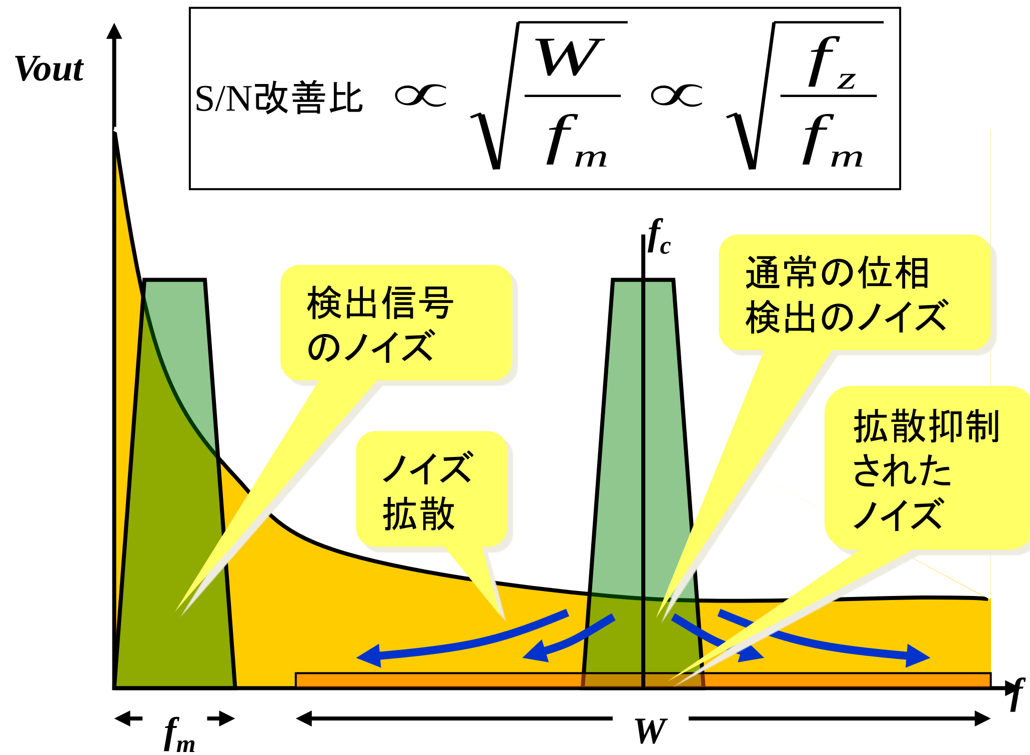
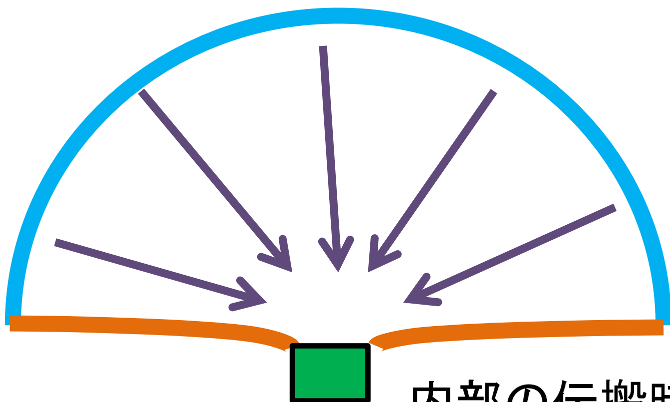


図２ ノイズ拡散抑制法による高感度検出の原理

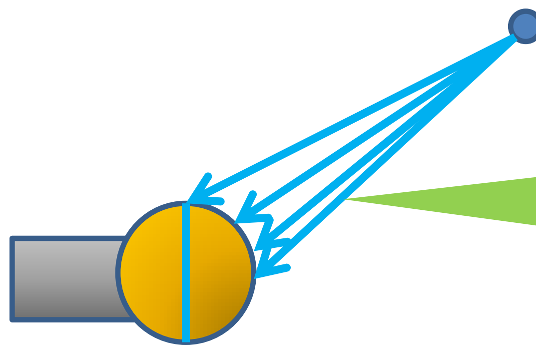
【Holophonic Sensor with Random Hole Pattern】

インパルス音源(δ(t)関数音源)を仮定すると、



マイクロフォン

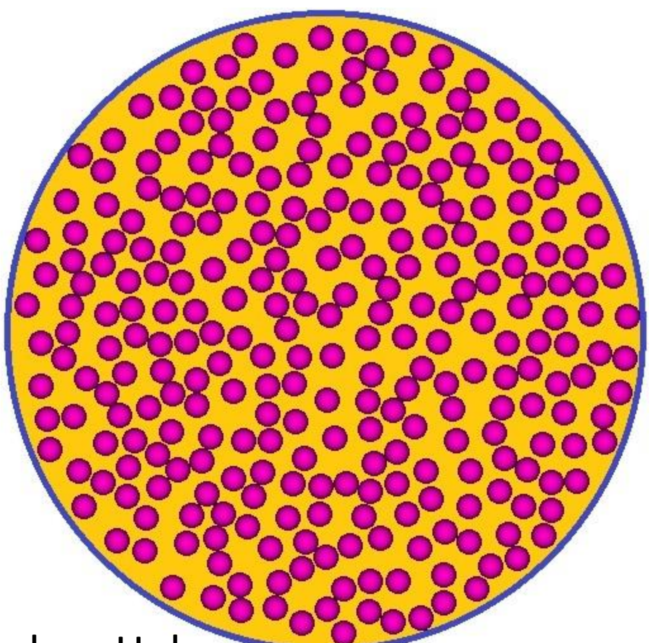
内部の伝搬時間
を同じに設計



音源

この問題は円形
ピストンが作る近
距離音場と等価

順次、小穴に入射

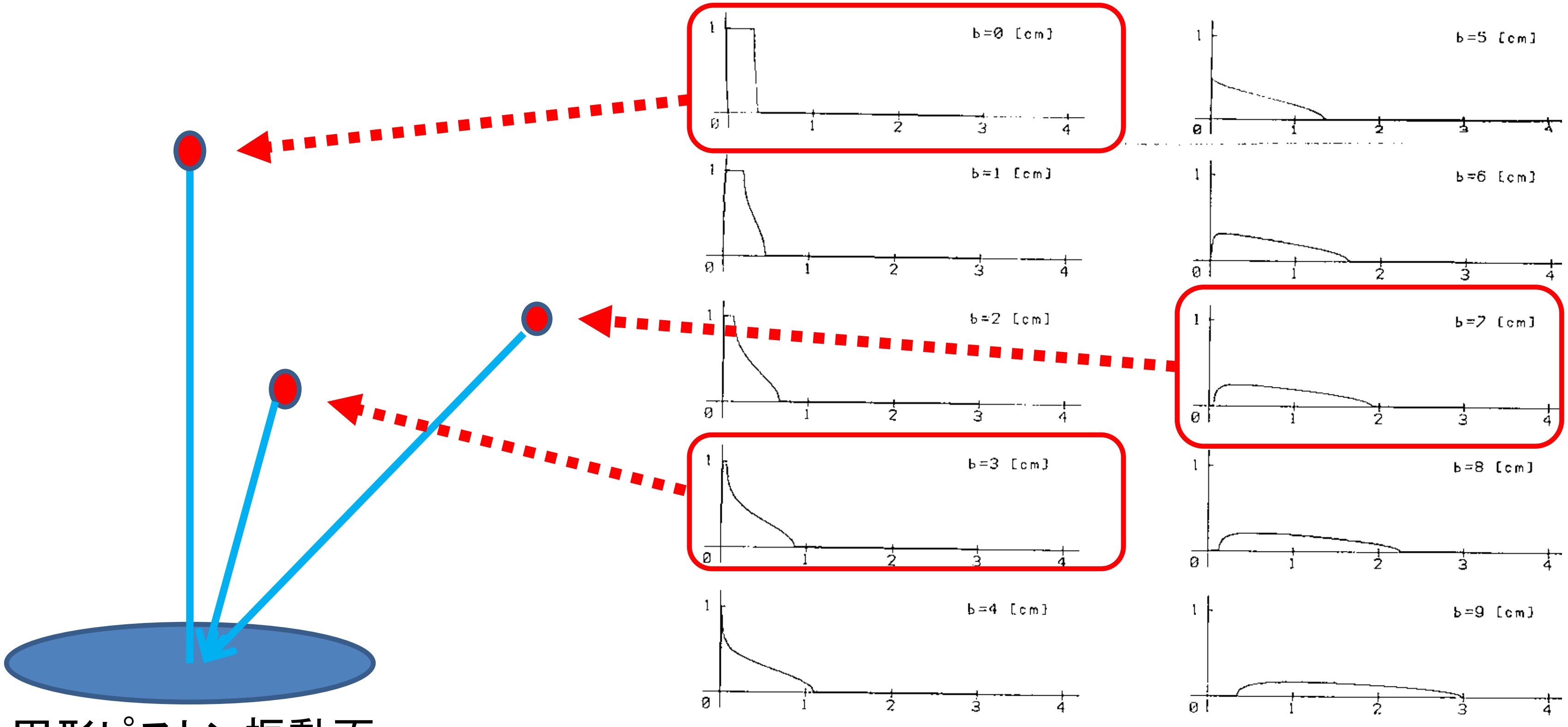


Random Hole

音源の3次元座標(xs, ys, zs)を与えれば、
円形ピストンの理論式を使って、各小穴
の速度ポテンシャル応答を求めることが
できる。

ランダム穴を持ったマイク内部に入射後
は円形ピストンの法線方向に音源がある
場合と同じ　⇒　伝搬時間分ずれる

正弦波1波音源の場合



速度ポテンシャル $\phi(t)$　$a=5$ cm, $d=50$ cm, time 20μsec/div

個々の小穴に対する速度ポテンシャルのインパルス応答は解析的に求めることができる。

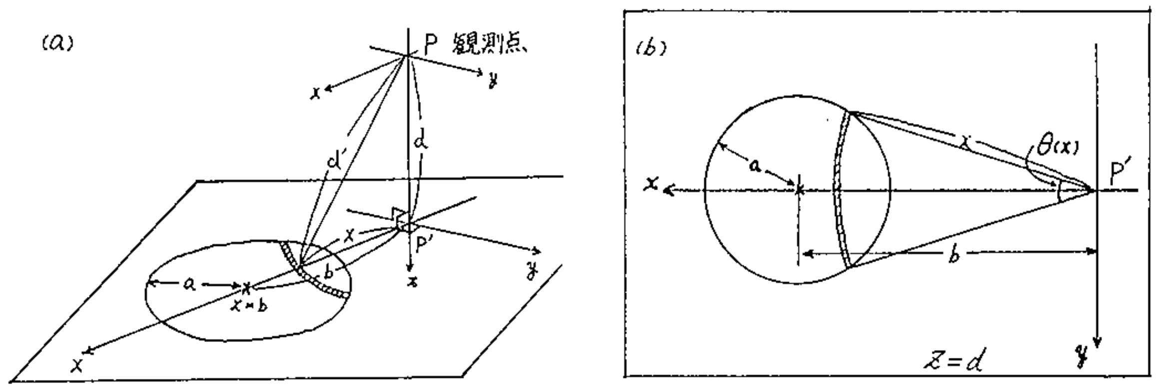
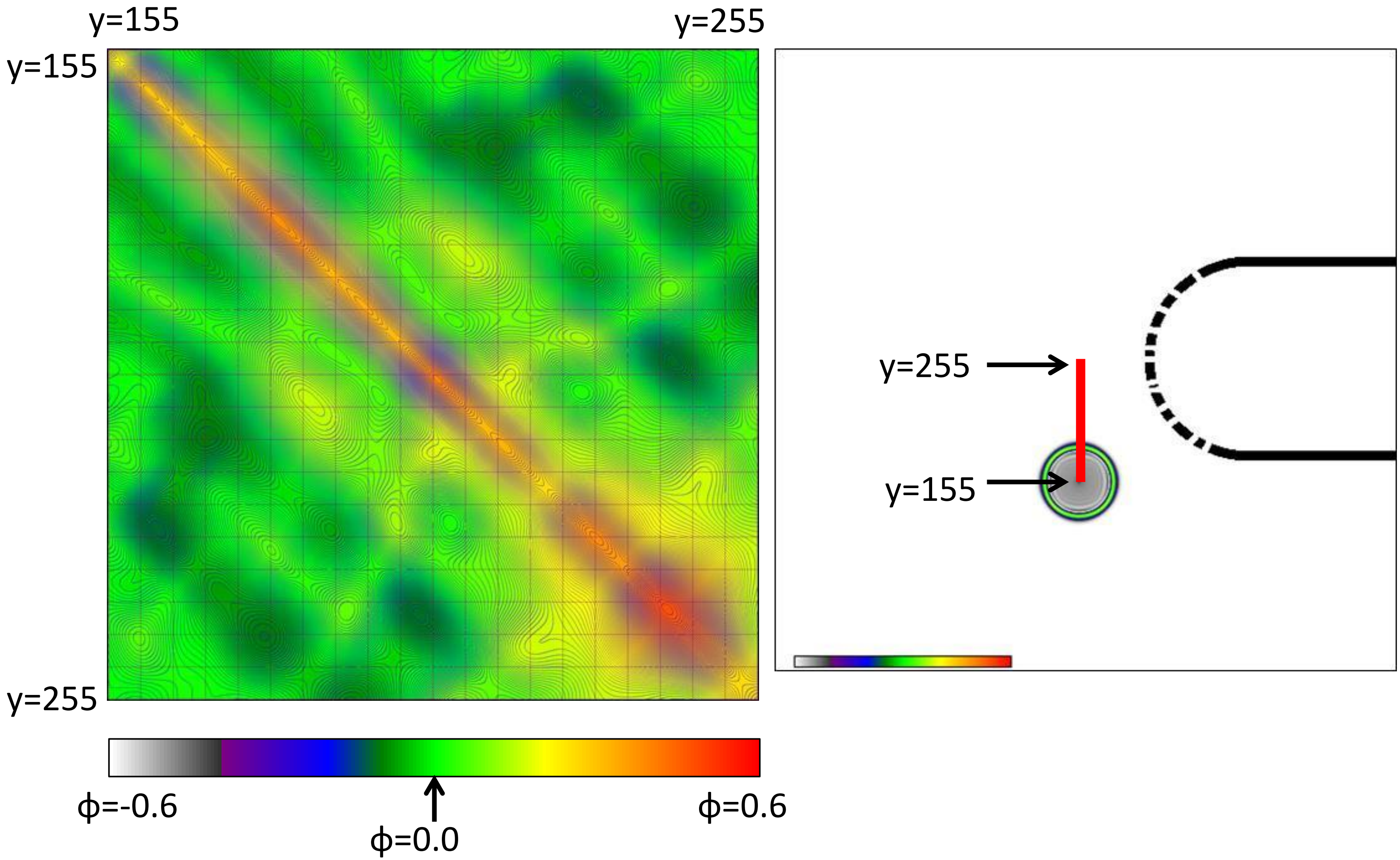


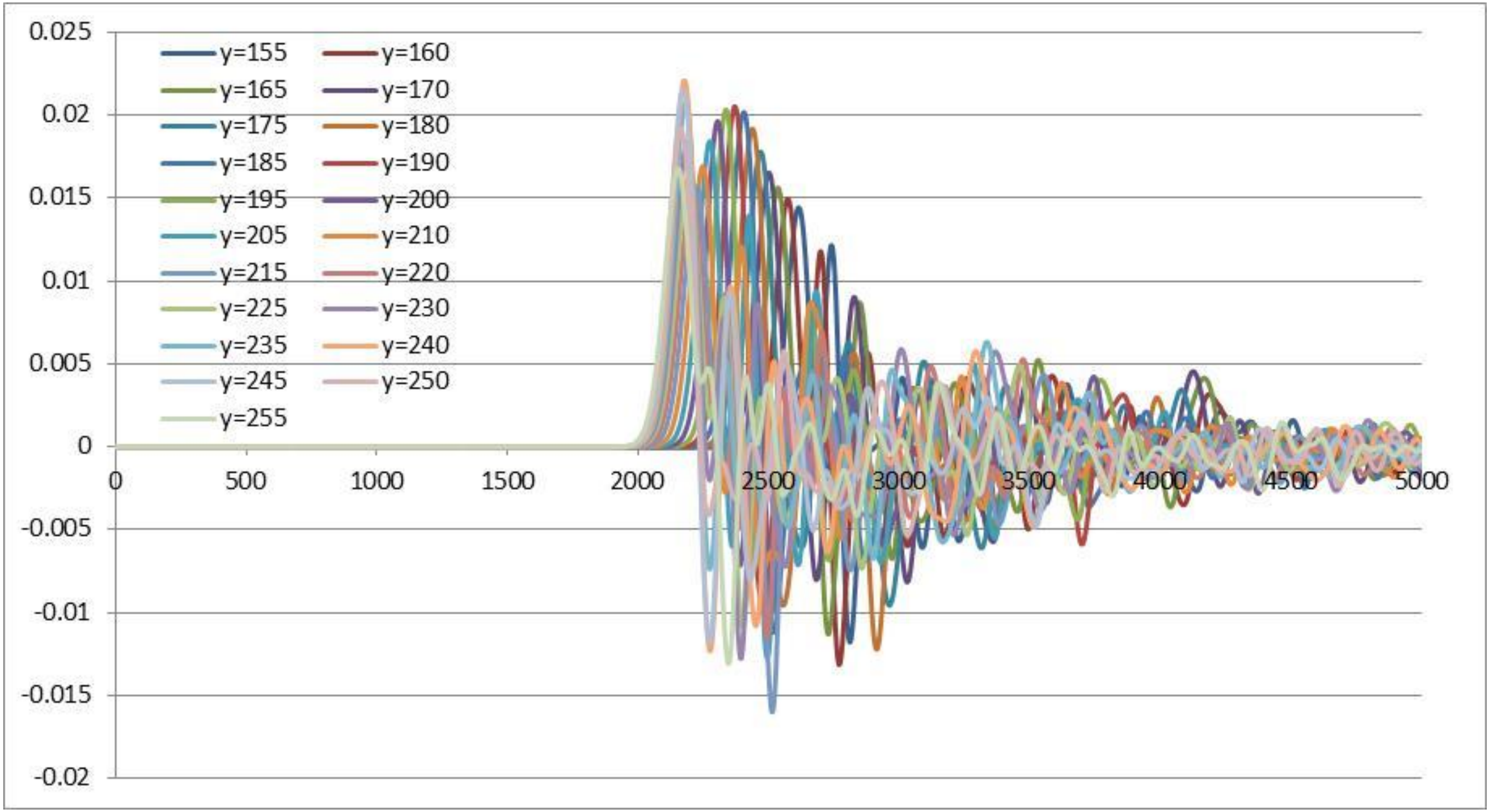
Fig. 10

【Holophonic Sensor with Random Hole Pattern】



【図１】相関値の等高線図
相互相関の無相関性を説明する図

【Holophonic Sensor with Random Hole Pattern】



音圧応答波形

【Holophonic Sensor with Random Hole Pattern】

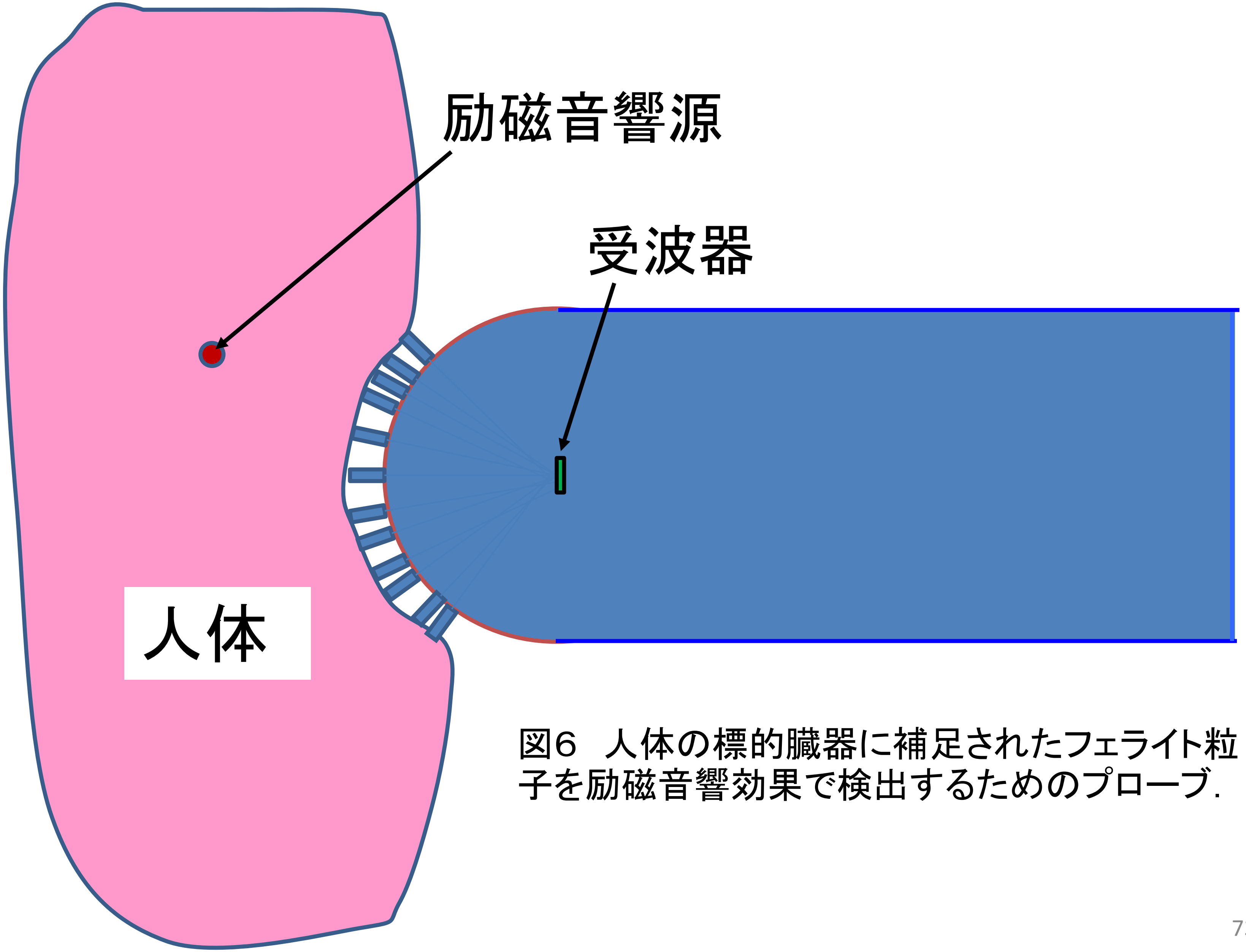


図６　人体の標的臓器に補足されたフェライト粒子を励磁音響効果で検出するためのプローブ.