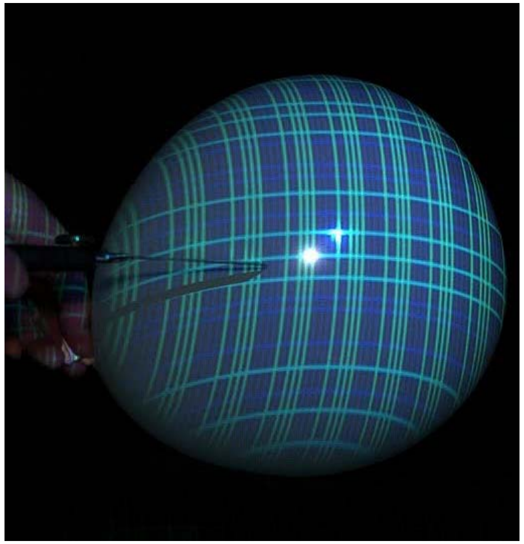
高速動体形状計測のための ワンショット3次元形状計測法

佐川立昌[1], 古川亮[2] , 川崎洋[3] , 八木康史[4]

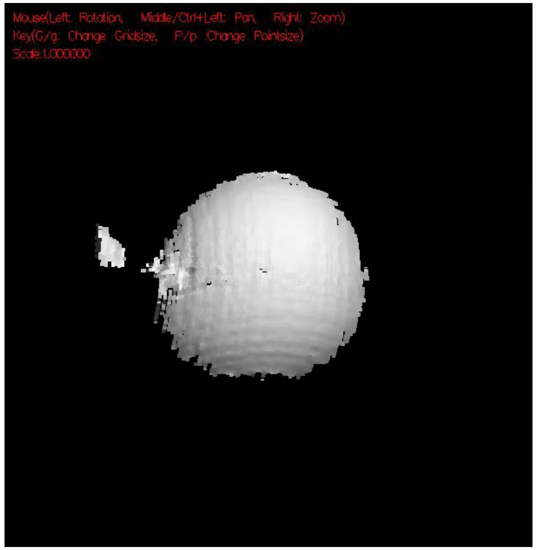
[1]産総研　[2]広島市立大学　[3]鹿児島大学　[4]大阪大学

実験結果：例1

- 風船の破裂
  - 1000fps



撮影シーン

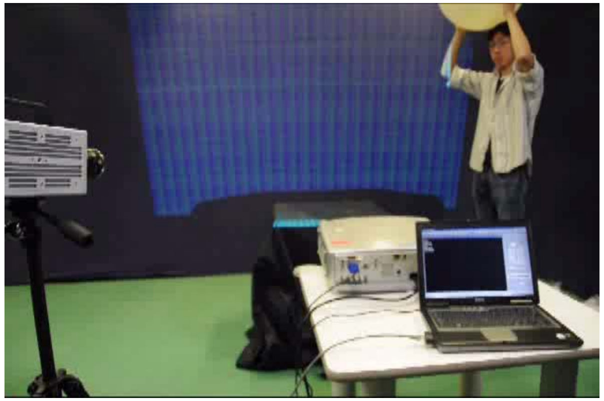


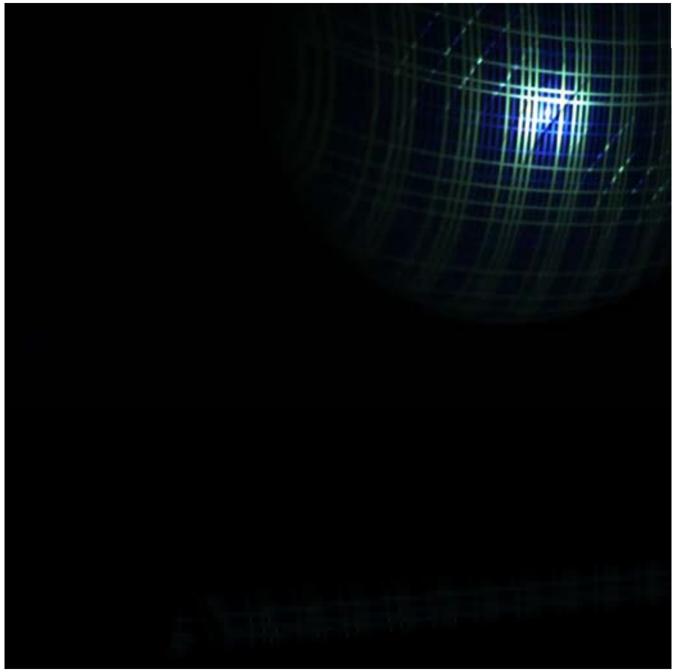
正面視点

横視点

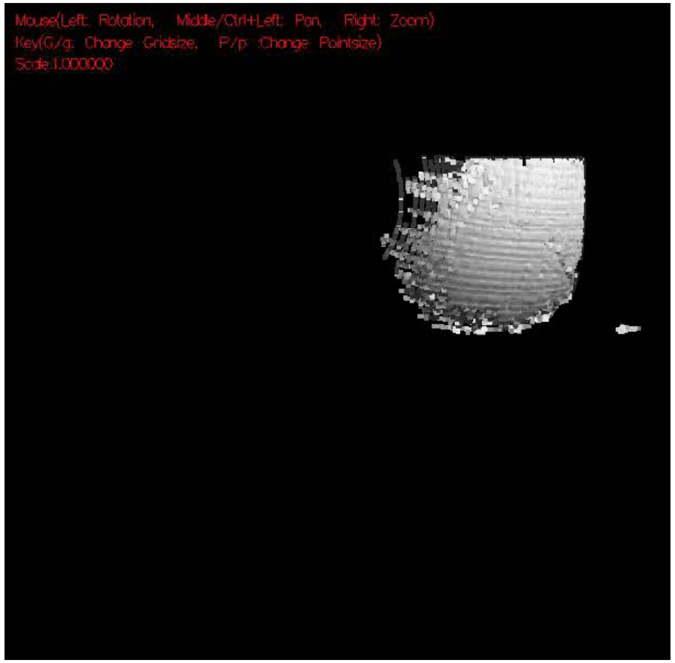
実験結果：例2

- バランスボールのバウンド
  - 2000fps
  - 表面を伝わる波を観測可能





撮影シーン



復元結果

研究の背景

- 過去の代表的な3次元計測は静止物体
- 運動・変形する物体の3次元形状を獲得したい
  - 応用例
    - 顔の表情のモーションキャプチャ
    - ロボットビジョンのアプリケーション
    - 医療・VR利用
    - 映画・ゲームなど

主な3次元計測手法

- アクティブ
  - レーザレンジファインダ
    - レーザの走査が必要
    - 動的シーンに不向き
  - パターンコード化法
    - 時間的：複数画像を投影
    - 空間的：単画像を投影

運動・変形物体の計測に適する

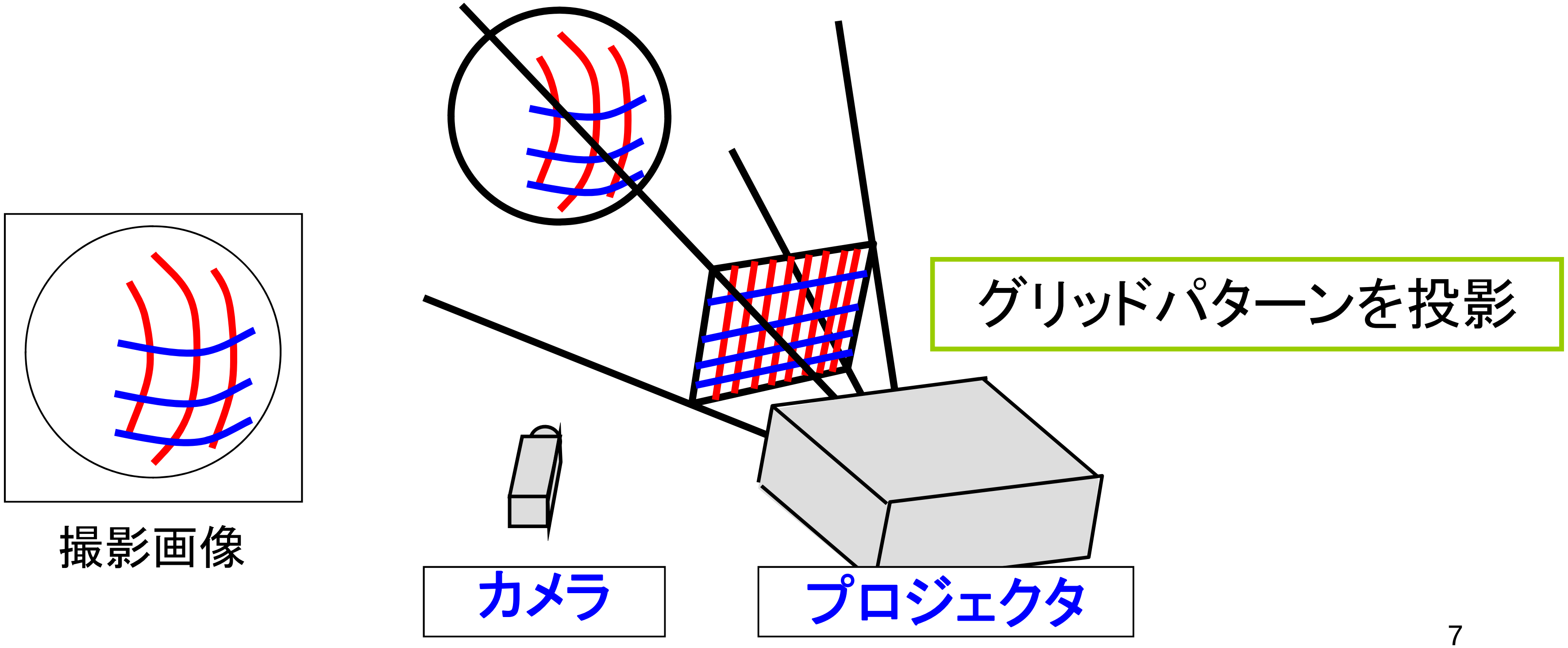
- パッシブ
  - ステレオ視
    - テクスチャが必要，対応点が不正確
  - 視体積交差法
    - カメラ多数必要，凹形状は苦手
  - 精度を上げるのが困難

提案手法

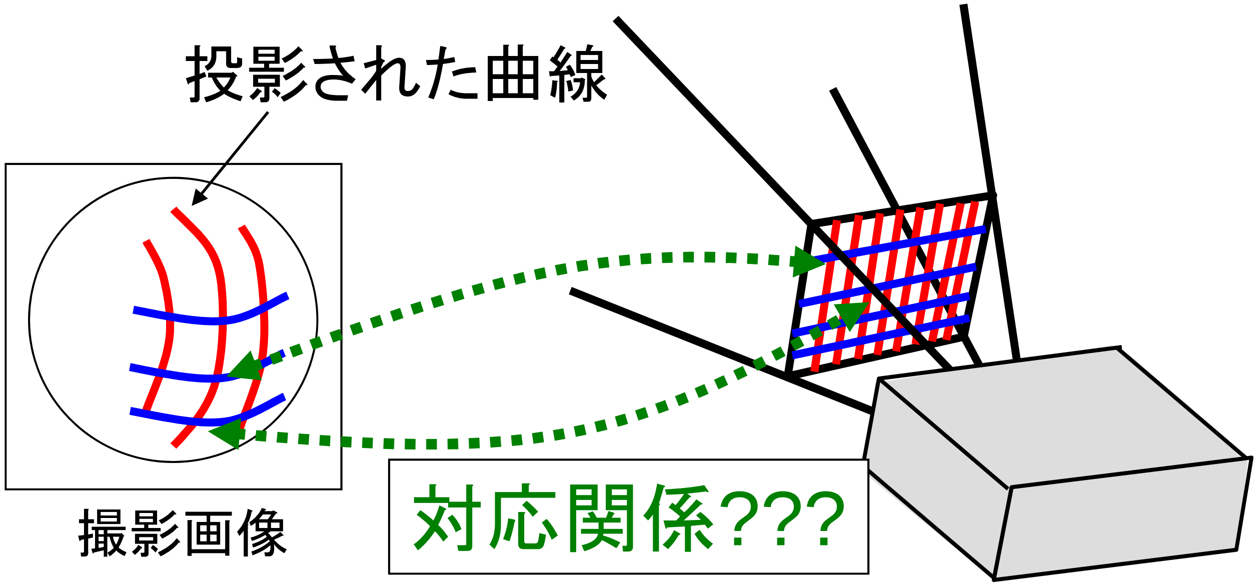
- 1カメラ＋1プロジェクタ
  - ICCV2009, MIRU2009
- 1カメラ＋2プロジェクタ
  - 3DPVT2010, MIRU2010
- マルチカメラ＋マルチプロジェクタ
  - 現在進行中

グリッドパターンによるワンショットスキャン

- Kawasaki et al.（CVPR, 2008）
  - 1枚の画像から3次元復元が可能



グリッドパターンによるワンショットスキャン

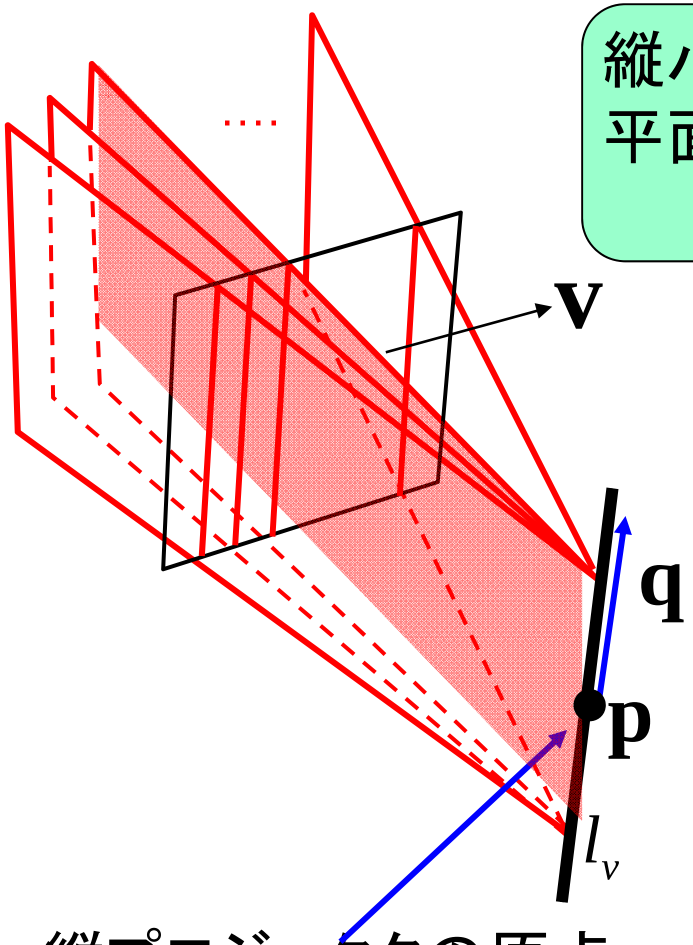


- 共面性による制約条件を用いる

[Kawasaki ACCV '07]

- 曲線上の点が同じ平面内にある

パターン平面の表現（縦平面）



縦パターン平面の係数：ベクトル $\mathbf{v}$
平面上の点： $\mathbf{x}$

$$\mathbf{v}\cdot\mathbf{x}+1=0$$

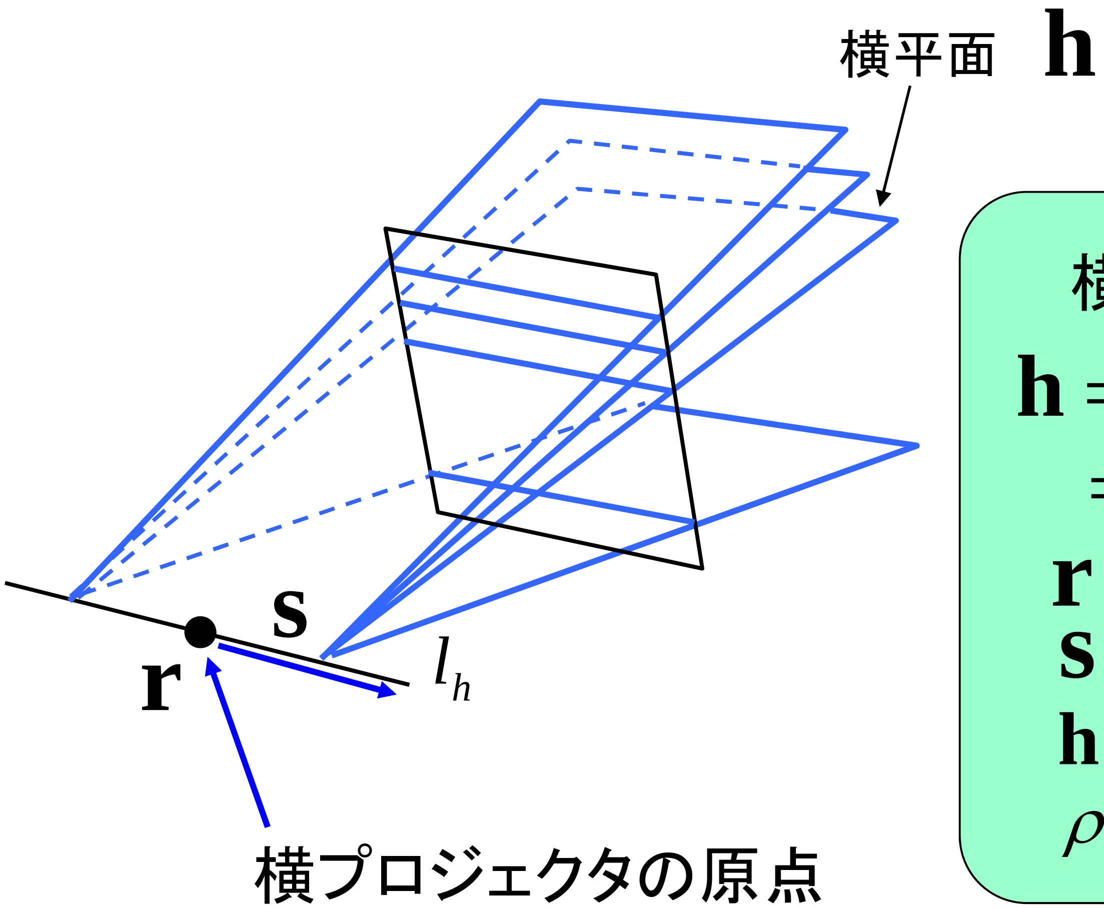
全ての縦平面 $\mathbf{v}$ は直線 l_v を含む

$$\mathbf{v}=\mathbf{v}_0+\mu\,(\mathbf{p}\times\mathbf{q})$$
$$=\mathbf{v}_0+\mu\,\mathbf{v}_d$$

$\mathbf{p}$ ：縦プロジェクタの原点座標
$\mathbf{q}$ ：直線 l_v の向き
$\mathbf{v}_0$ ： l_v を含む任意の平面の係数
μ ：平面の1次元パラメータ

平面 $\mathbf{v}$ は1次元パラメータ μ で表現できる

パターン平面の表現(横平面)



横平面 $\mathbf{h}$ は l_h を含む

$$\mathbf{h} = \mathbf{h}_0 + \rho(\mathbf{r} \times \mathbf{s})$$
$$= \mathbf{h}_0 + \rho\,\mathbf{h}_d$$

$\mathbf{r}$:横プロジェクタの原点座標

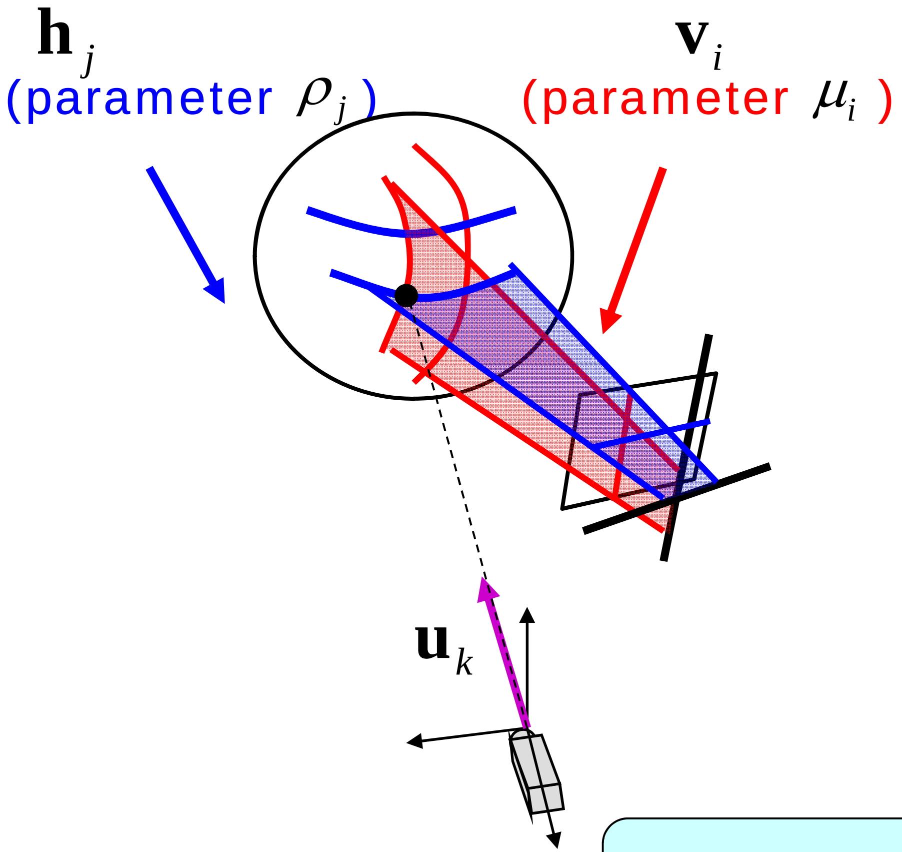
$\mathbf{s}$:直線 l_h の向き

$\mathbf{h}_0$: l_h を含む任意の平面の係数

ρ :平面の1次元パラメータ

平面 $\mathbf{h}$ は1次元パラメータ ρ で表現できる

交点から得られる拘束条件（共面性拘束）



パターン平面： $\mathbf{v}_i$ $\mathbf{h}_j$

交点： $\mathbf{u}_k$

交点は両方の平面上にある

$$\mathbf{u}_k \cdot (\mathbf{v}_i - \mathbf{h}_j) = 0$$

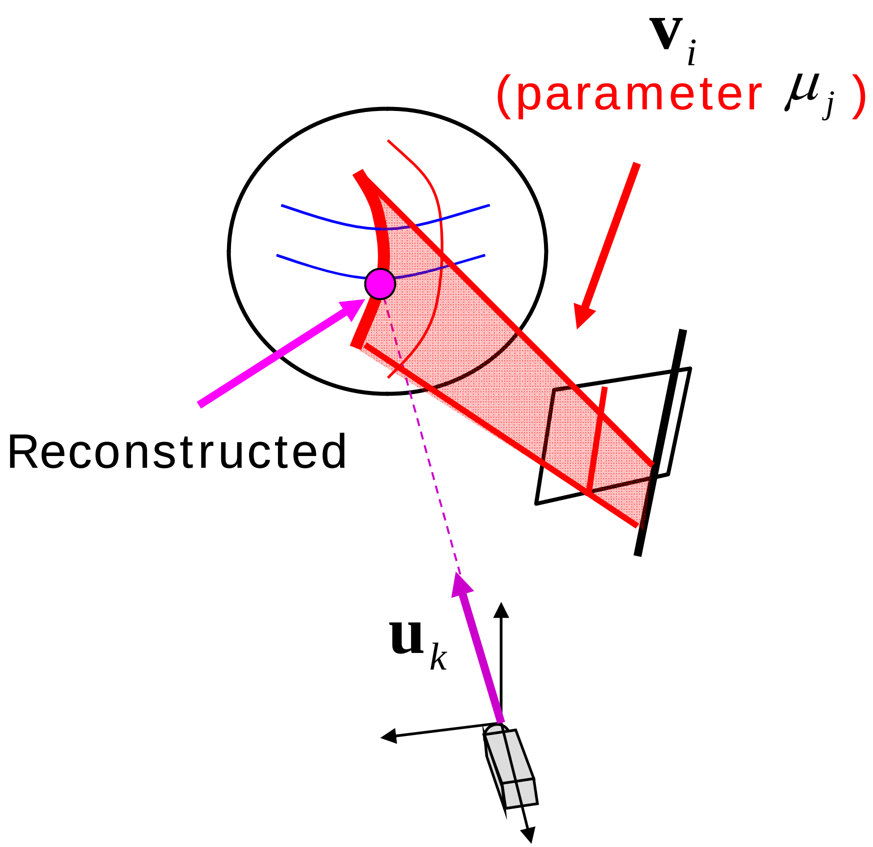
$$A_k \mu_i - B_k \rho_j = C_k$$

$$A_k \equiv \mathbf{u}_k \cdot \mathbf{v}_d$$
$$B_k \equiv \mathbf{u}_k \cdot \mathbf{h}_d$$
$$C_k \equiv \mathbf{u}_k \cdot (\mathbf{v}_0 - \mathbf{h}_0)$$

μ_i と ρ_j に関する1次方程式

三角測量による形状復元

- 平面パラメータが決定されると，三角測量により，ライン上の3次元点が計算できる



線検出とパターンの工夫

- Belief-Propagation (BP)に基づいた線検出
  - 1色でも縦横別々に検出可能
  - 高密度パターンでも安定して検出可能
- カラーコードの利用
  - デブルーイン系列を用いたパターン
  - 縦線、横線にそれぞれにIDを埋め込む
  - 誤接続，誤対応を減少させ，安定性向上

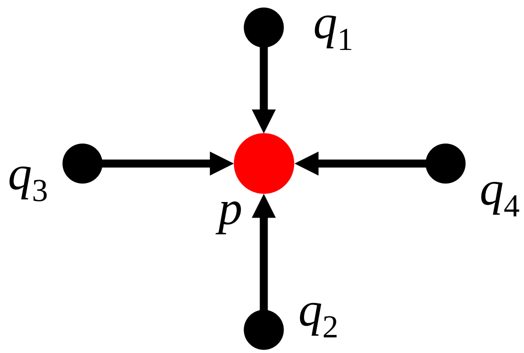
BPの概要

グラフのエネルギー最小化問題

$$E(f)=\sum_{p\in V} D_p(f_p)+\sum_{(p,q)\in E} W_{pq}(f_p, f_q)$$

ラベル f_p をノード p に
割り振るときのデータコスト

ノード p , q にラベル f_p , f_q を
割り振るときの不連続コスト

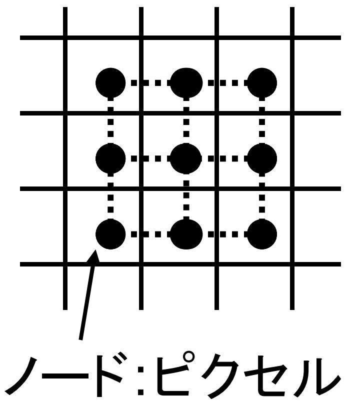


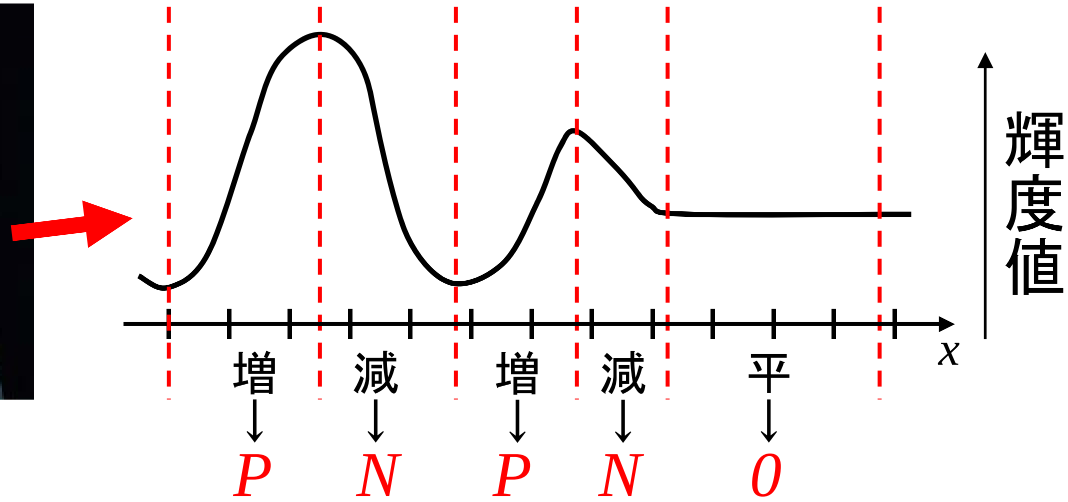
V ：ノードの集合
E ：ノード間の
リンクの集合

メッセージパッシングの繰り返し計算によって，
コストが最小となるラベル付けを決定

BPを用いた線検出

- ラベルの区別
  - P, N, 0 の3種類





- データコスト（縦線の場合）

$$D_p(f_p)=\begin{cases} I(x+1,y)-I(x,y) & \text{if } f_p=N \\ \left|I(x+1,y)-I(x,y)\right| & \text{if } f_p=0 \\ -(I(x+1,y)-I(x,y)) & \text{if } f_p=P \end{cases}$$

I : 輝度値

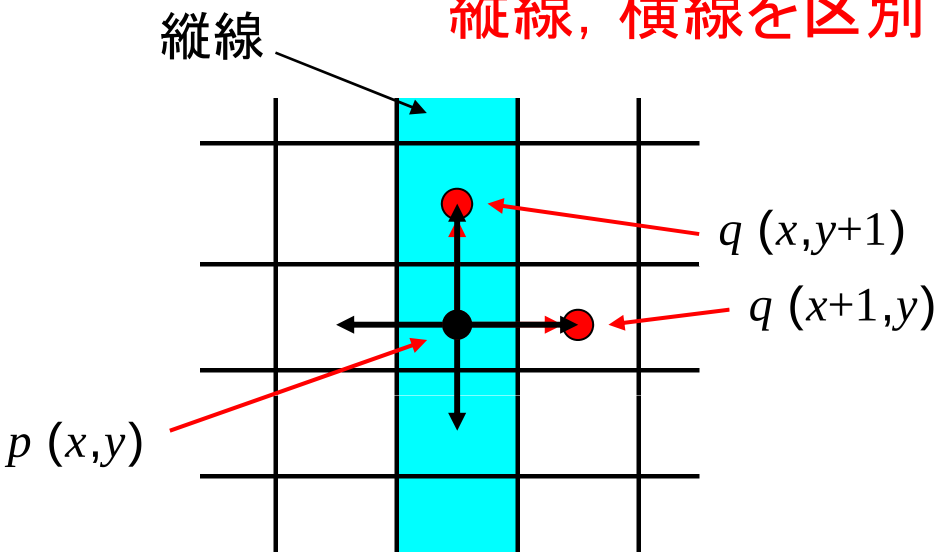
BPを用いた線検出

- 不連続コスト（縦線の場合）
  - 隣接ピクセルを考慮

$$f_p = \begin{cases} 2 & \text{ラベルが } P \text{ のとき} \\ 1 & \text{ラベルが } O \text{ のとき} \\ 0 & \text{ラベルが } N \text{ のとき} \end{cases}$$

$$W_{pq}(f_p, f_q) = \begin{cases} \boxed{-\lambda(f_q - f_p)(I(x+1,y) - I(x,y)) \quad \text{X軸方向}} \\ \boxed{\left| f_q - f_p \right| \quad \text{Y軸方向}} \end{cases}$$

軸の向きによって式を変えることで
縦線，横線を区別可能



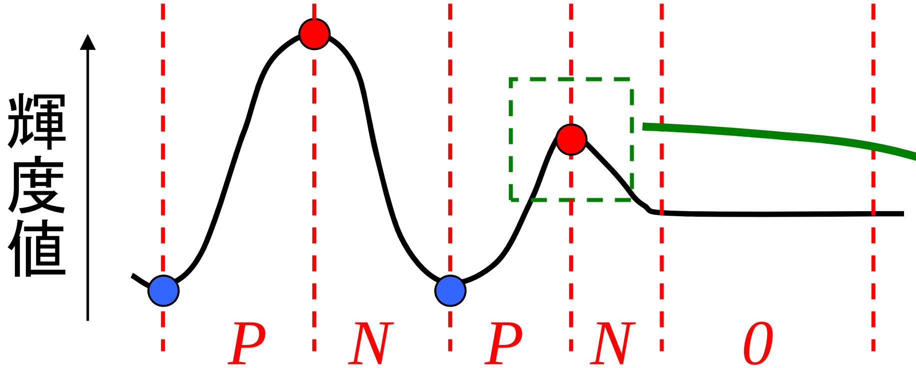
ラベルが同じときコスト小

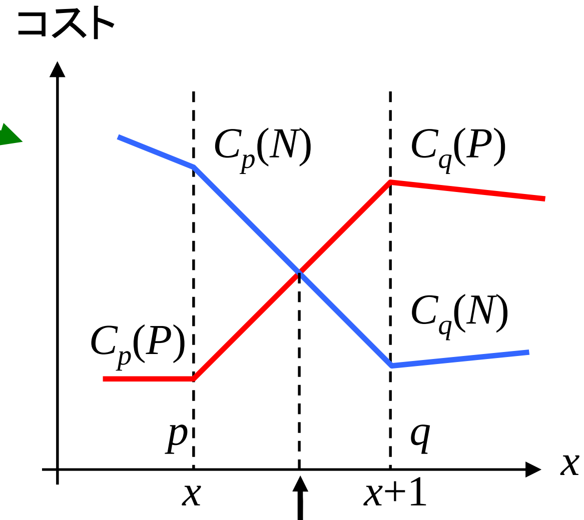
輝度値の変化に応じて
コストを変える

BPを用いた線検出

- 輝度値のピークを線とみなす
  - 極大 ： ポジティブピーク
  - 極小 ： ネガティブピーク

  ⇒ 線の数が2倍

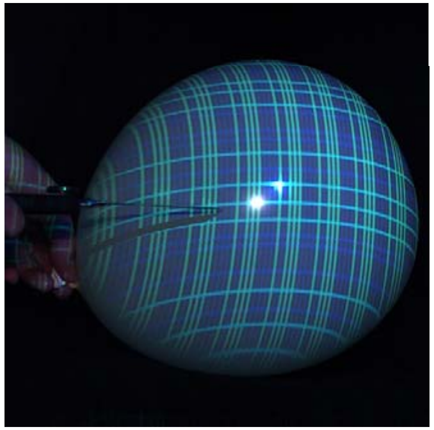




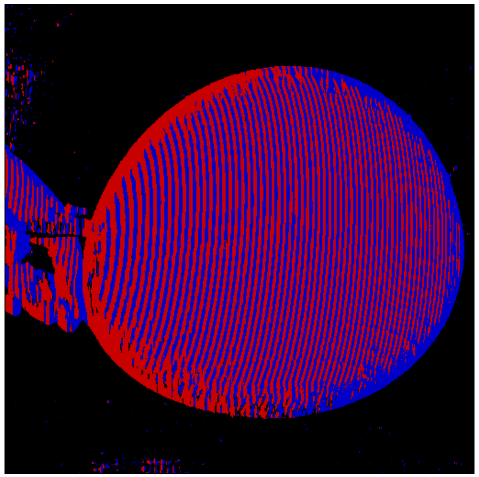
- サブピクセルの計算
  - コストCを利用した線形補間
    - コストC ＝ データコスト＋不連続コスト

$$x+\frac{C_p(N)-C_p(P)}{(C_p(N)-C_p(P))-(C_q(N)-C_q(P))}$$

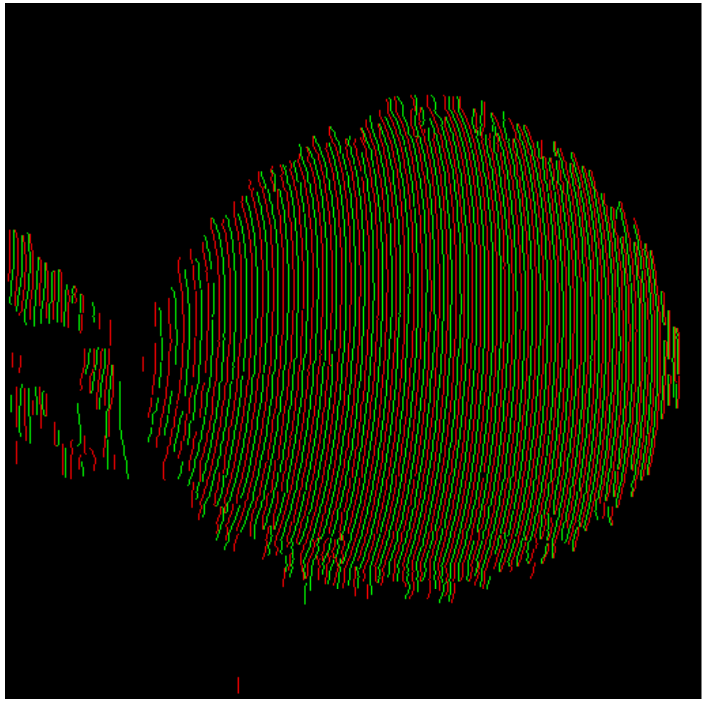
線抽出の結果



ラベリング



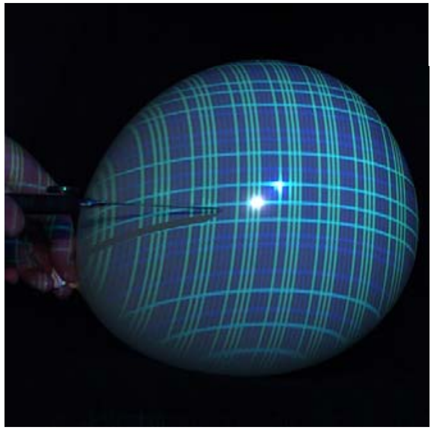
縦線抽出



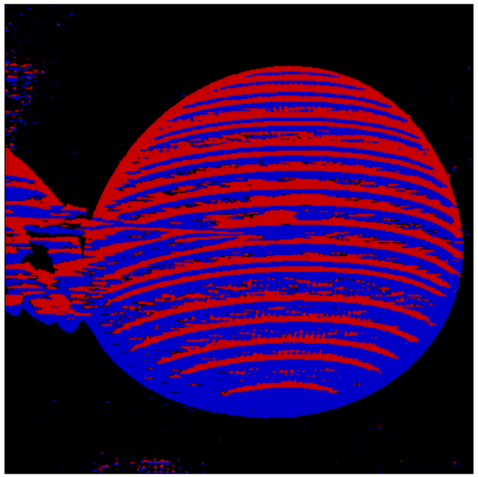
10 ループ目

赤 ：ラベルP
青 ：ラベルN
黒 ：ラベル0

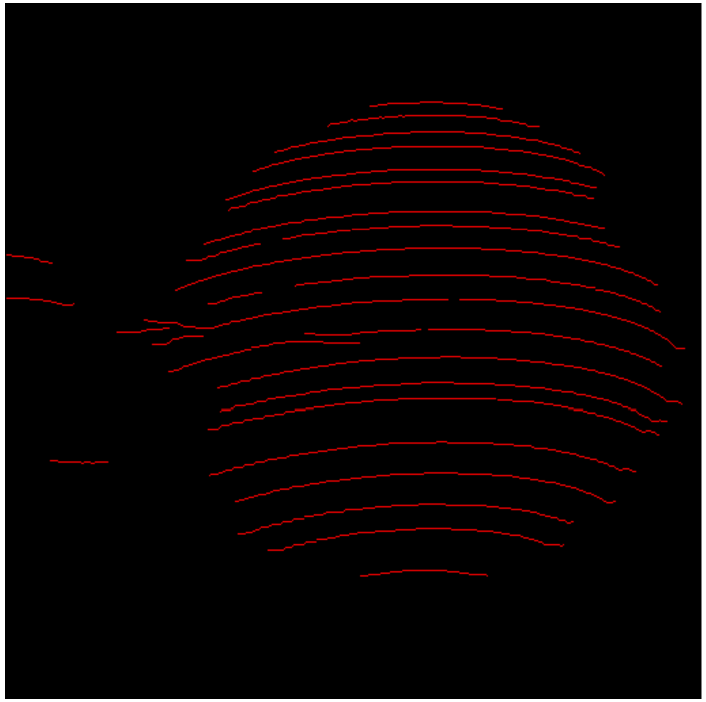
線抽出の結果



ラベリング



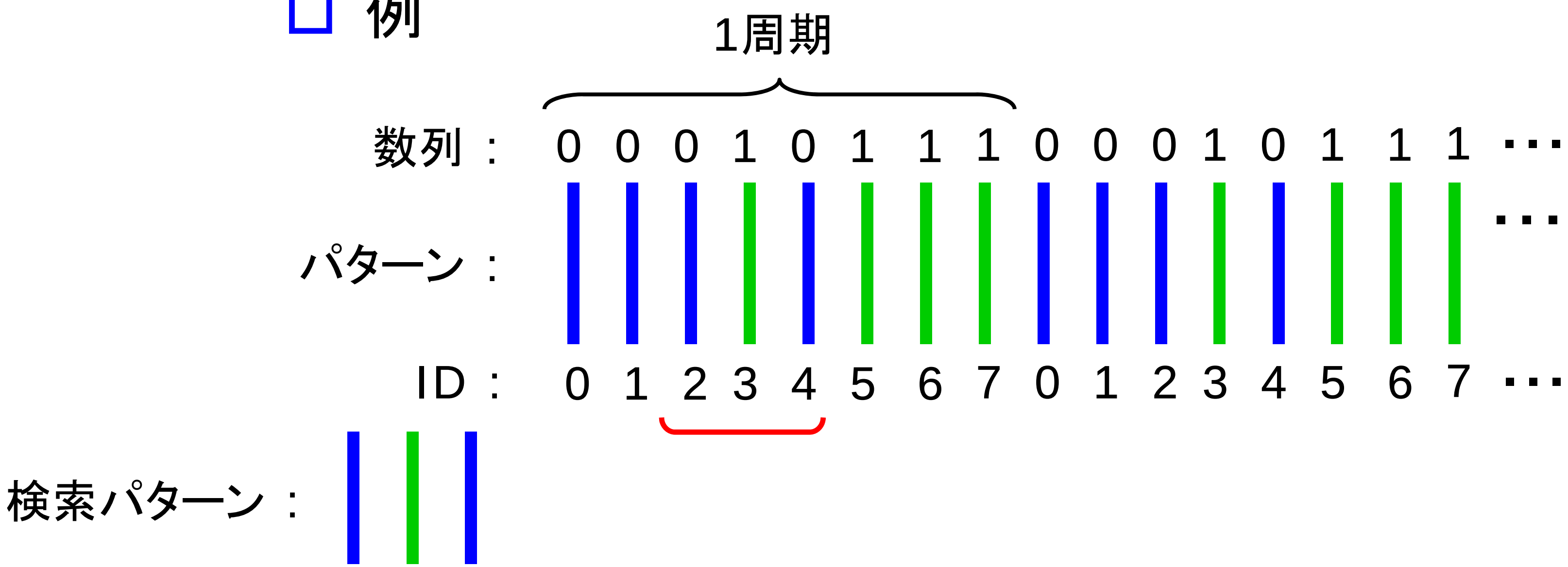
横線抽出



赤 ：ラベルP
青 ：ラベルN
黒 ：ラベル0

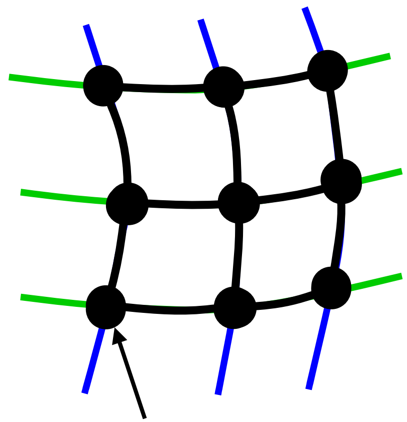
カラーコードの導入

- デブルーイン系列
  - 長さ n, 記号数 q のとき長さ q^n の数列
  - 長さ n の部分数列から位置を一意に特定可能
  - 今回は n=3, q=2 の長さ8の数列を使用
    - 8本1周期とし，繰り返す
    - 例



カラーコードの識別

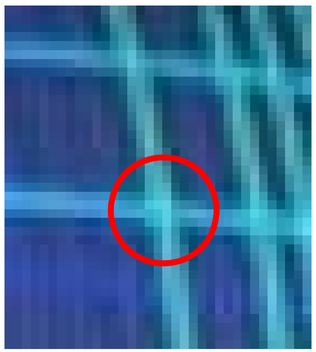
- BPを用いてコードを識別
  - 縦線，横線の接続から識別
  - ラベル f ：0～7
    - デブルーイン系列のID
- データコスト

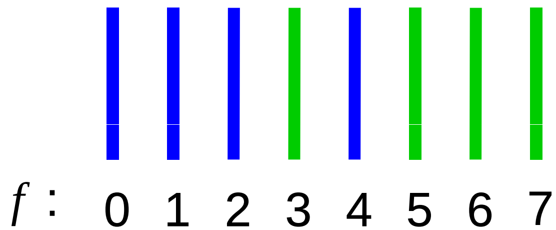


$$D_p(f_p) = |H(p) - H(f_p)|$$

交点 p の色相

投影パターン中でのラベル f_p の線の色相



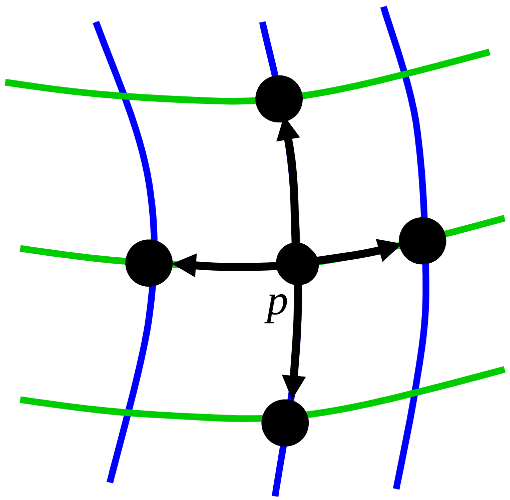


カラーコードの識別(3/3)

□ 不連続コスト

$$W_{pq}(f_p, f_q) = \min(|(f_p + d(p,q)) \bmod 8 - f_q|,$$
$$|8 - (f_p + d(p,q)) \bmod 8 - f_q|)^2$$

（縦線の場合）



$$d(p,q) = \begin{cases} 1 & q\text{ がx軸方向の隣の線} \\ -1 & q\text{ がx軸方向と逆の隣の線} \\ 0 & \text{その他} \end{cases}$$

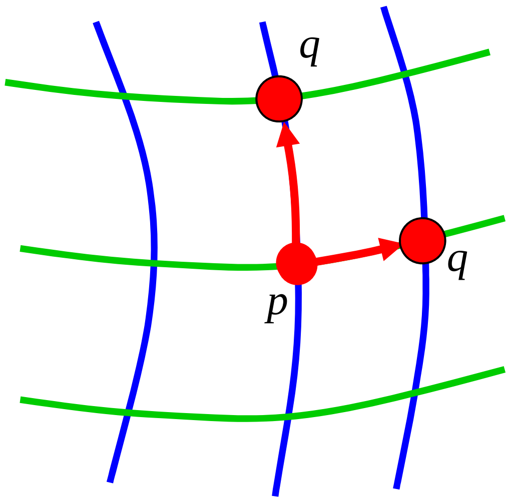
カラーコードの識別(3/3)

- 不連続コスト

$$W_{pq}(f_p, f_q) = \min(|(f_p + d(p,q)) \bmod 8 - f_q|,$$
$$|8 - (f_p + d(p,q)) \bmod 8 - f_q|)^2$$

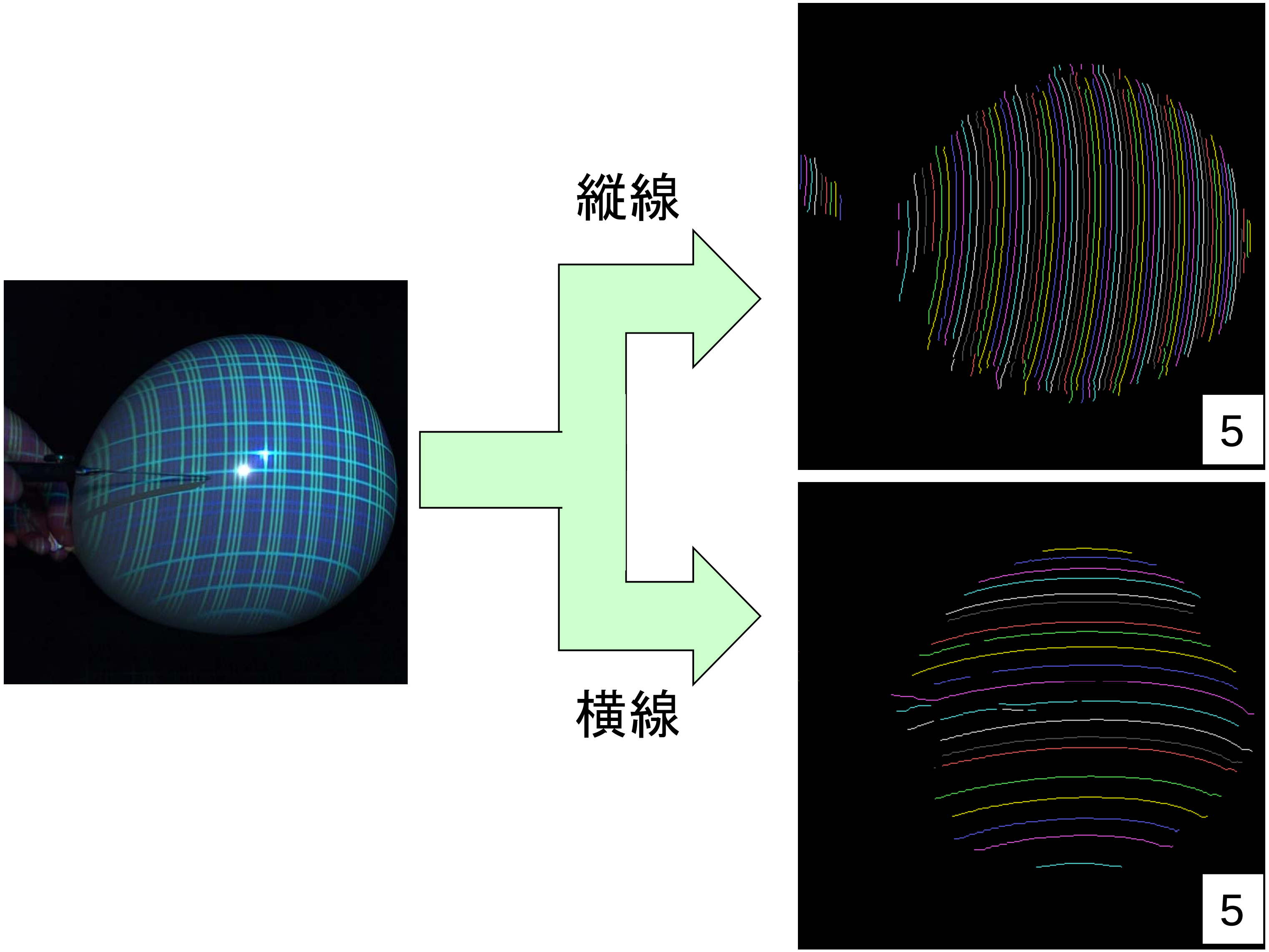
p , q のラベルが同じときコスト小

1　q がx軸方向の隣の線



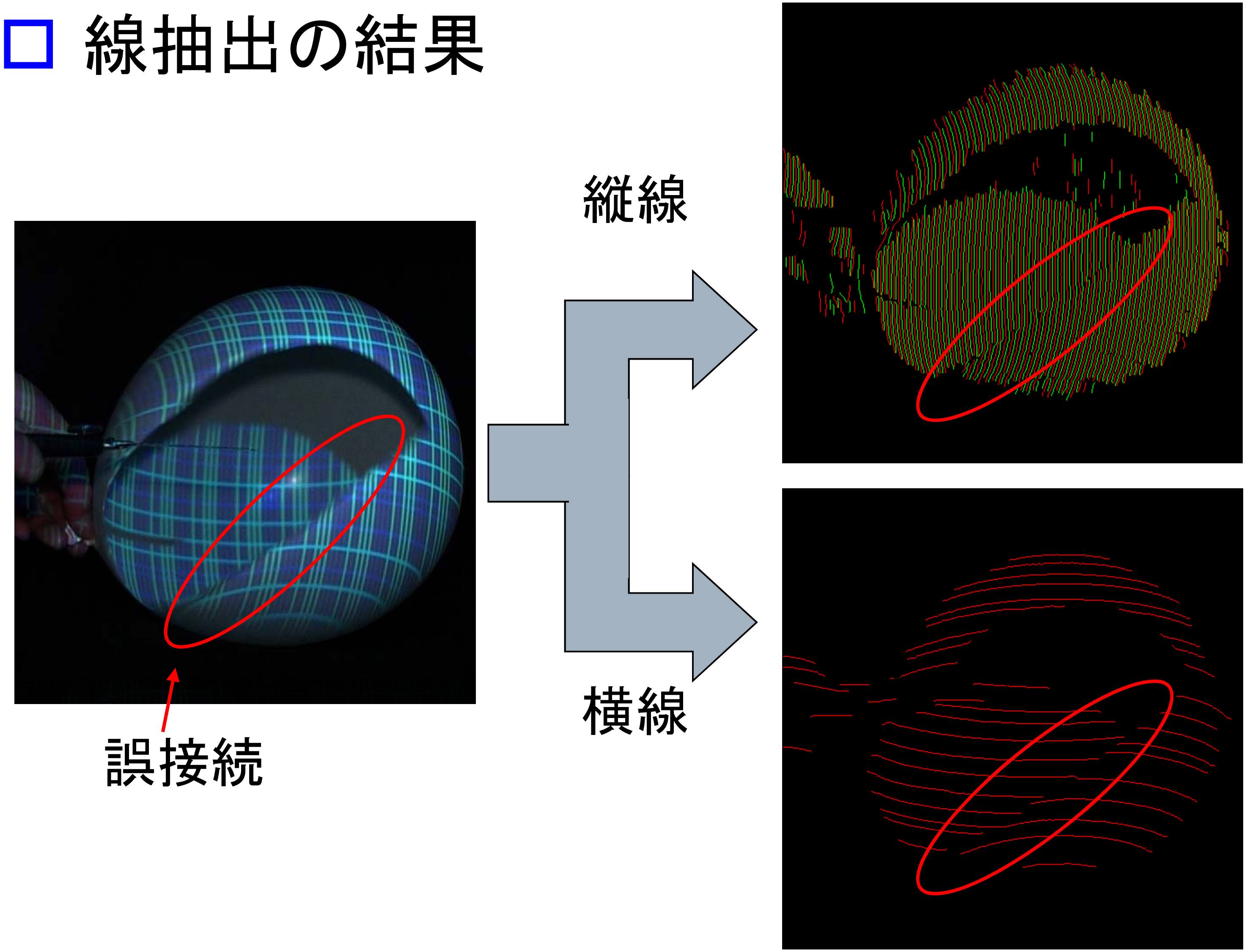
p , q のラベルの差が1のときコスト小

カラーコード識別の結果



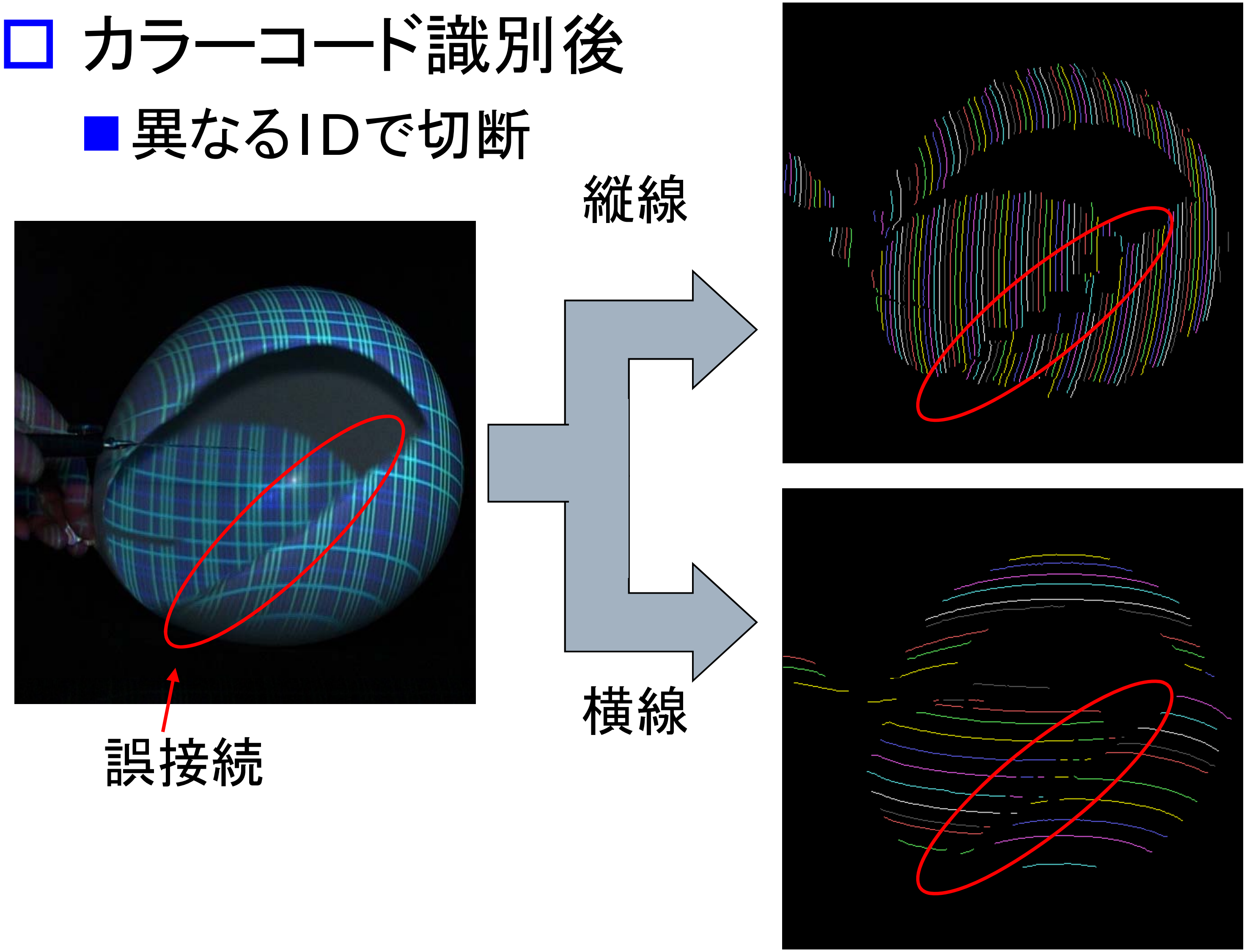
デブルーイン系列による誤接続の解消

- 線抽出の結果

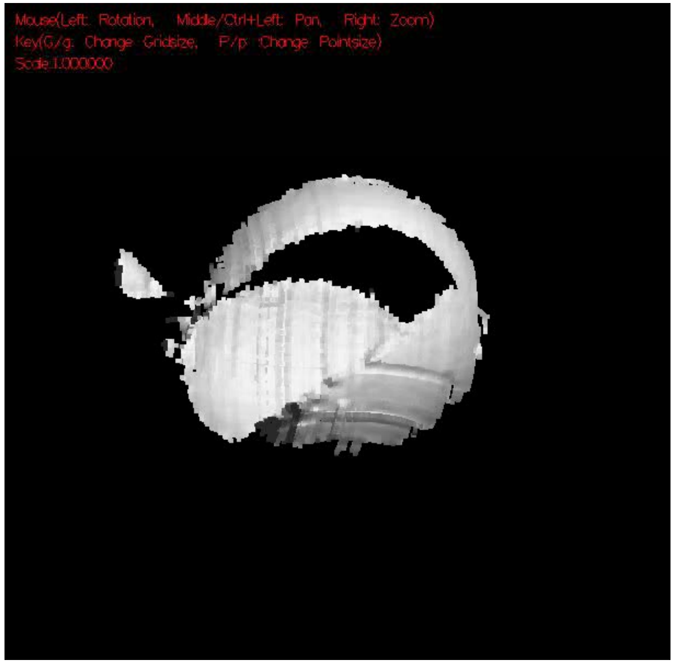


デブルーイン系列による誤接続の解消

- カラーコード識別後
  - 異なるIDで切断



誤接続の解消による復元結果



解消前

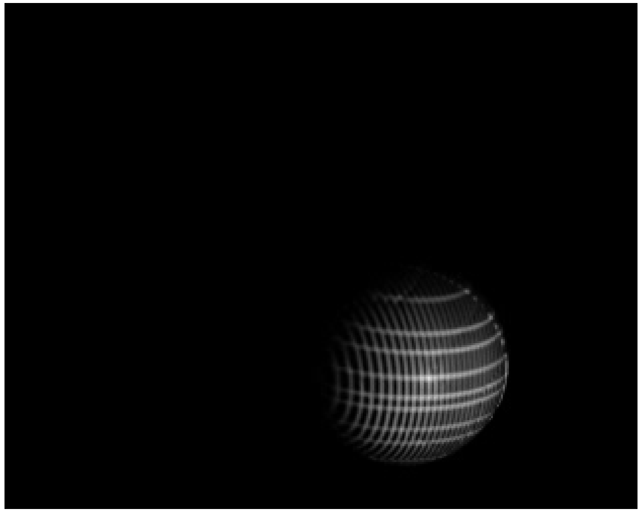
解消後

実験

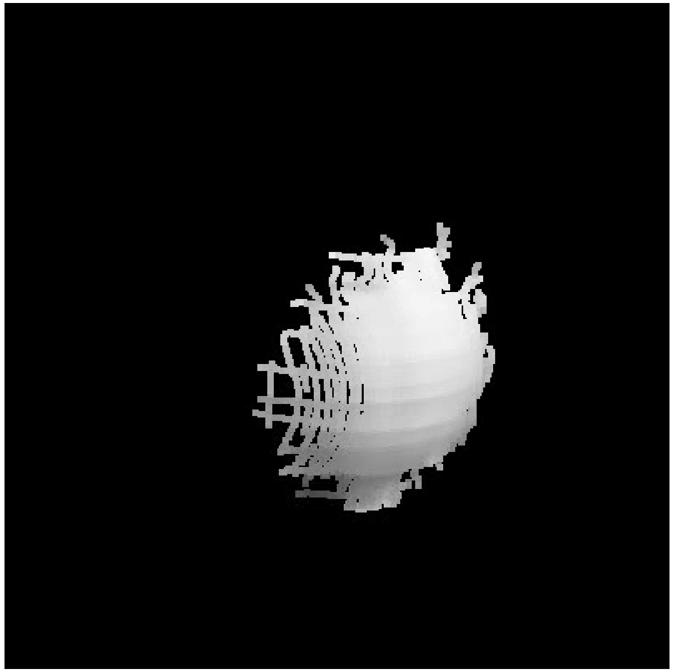
- 形状計測
  - ハイスピードカメラを使用
    - 300～32000fps
  - 撮影シーン
    - 風船の破裂
    - ボールのバウンド
    - 旗を振る

動画を用いた復元結果(3/4)

- ゴムボールのバウンド
  - モノクロカメラで撮影
  - 16000fps



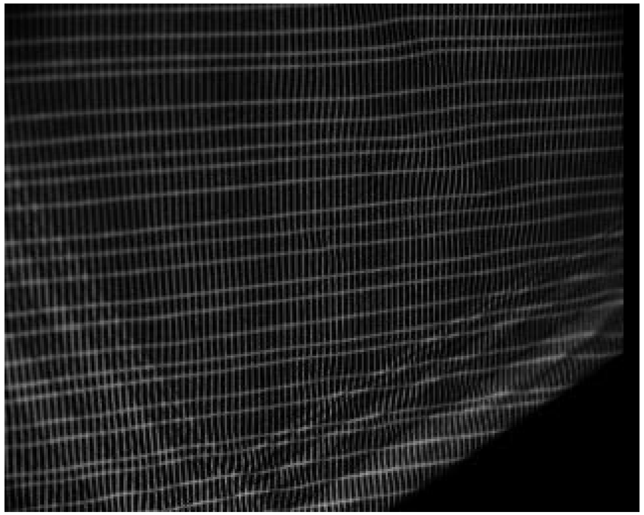
撮影シーン



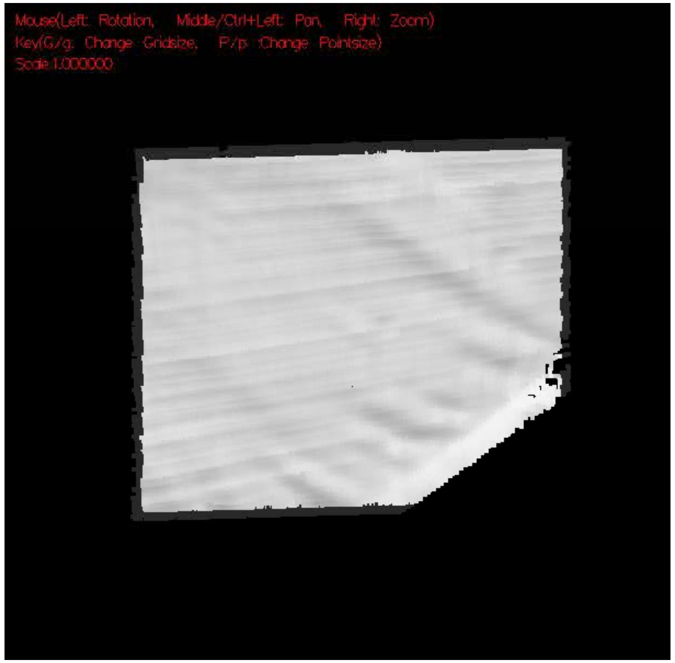
復元結果

動画を用いた復元結果(4/4)

- 旗を振る
  - 16000fps



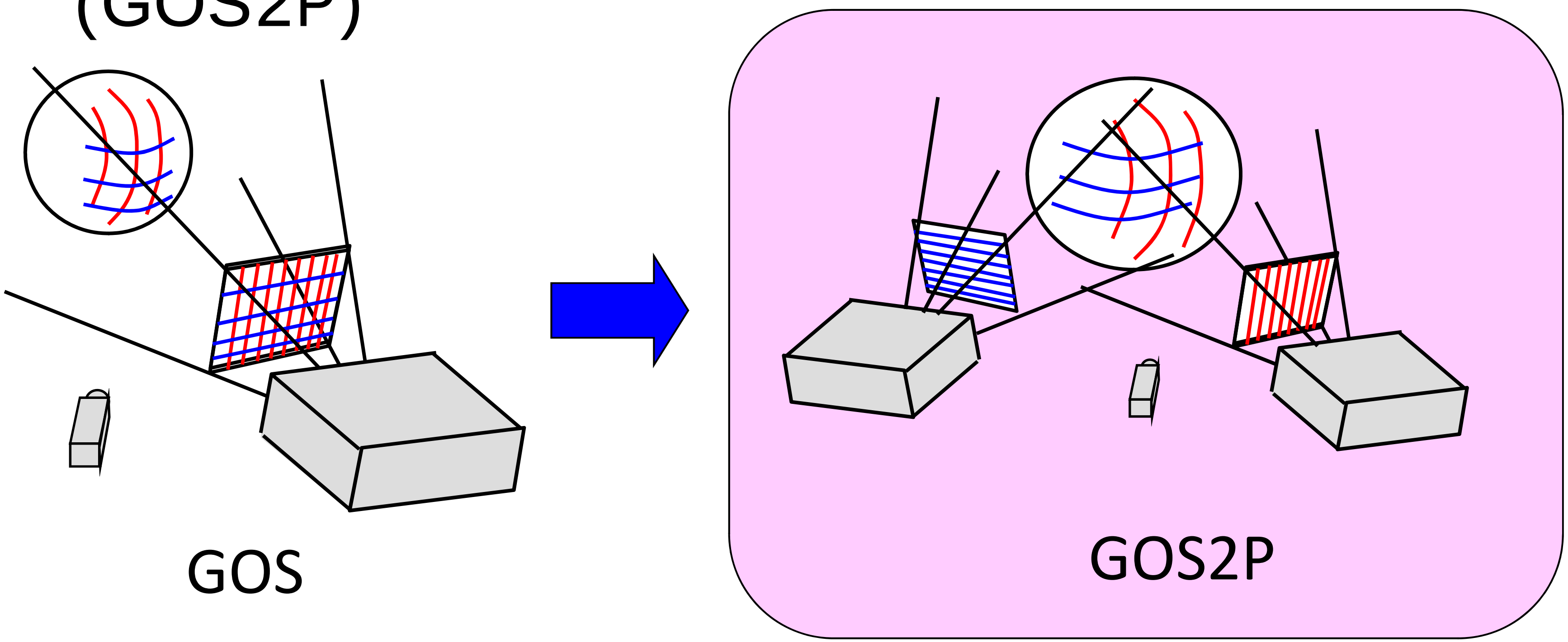
撮影シーン



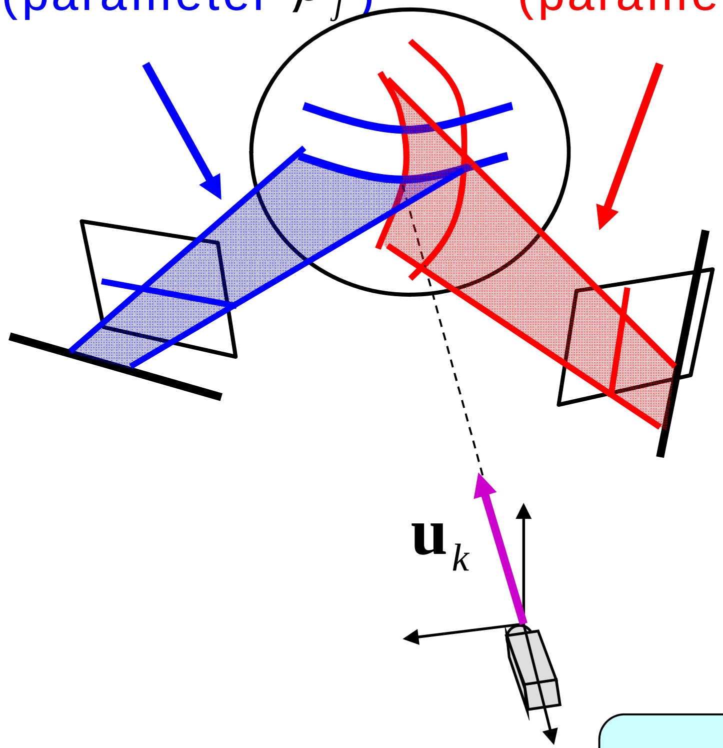
復元結果

第2のアプローチ

- 1カメラ＋1プロジェクタを一般化
  - 縦線・横線パターンを分離し，別のプロジェクタから投影
- 2プロジェクタ グリッドベースワンショット形状計測法
  Grid-based Oneshot Scan using 2 Projectors (GOS2P)



交点から得られる拘束条件（共面性拘束）



パターン平面： $\mathbf{v}_i$　$\mathbf{h}_j$

交点： $\mathbf{u}_k$

交点は両方の平面上にある

$$\mathbf{u}_k \cdot (\mathbf{v}_i - \mathbf{h}_j) = 0$$

$$A_k \mu_i - B_k \rho_j = C_k$$

$$A_k \equiv \mathbf{u}_k \cdot \mathbf{v}_d$$
$$B_k \equiv \mathbf{u}_k \cdot \mathbf{h}_d$$
$$C_k \equiv \mathbf{u}_k \cdot (\mathbf{v}_0 - \mathbf{h}_0)$$

μ_i と ρ_j に関する1次方程式

GOS(1プロジェクタ) VS GOS2P(2プロジェクタ)

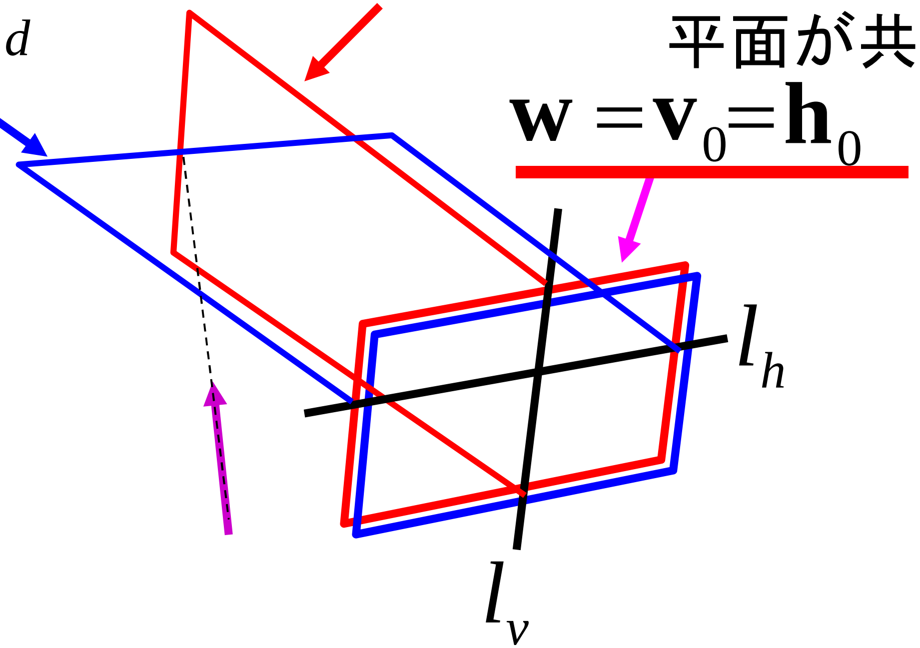
GOSの場合

$$\mathbf{h}_j = \mathbf{h}_0 + \mu_i \mathbf{h}_d$$

$$\mathbf{v}_i = \mathbf{v}_0 + \mu_i \mathbf{v}_d$$

平面が共通

$$\mathbf{w} = \mathbf{v}_0 = \mathbf{h}_0$$



$$A_k \mu_i - B_k \rho_j = C_k$$

$$A_k \equiv \mathbf{u}_k \cdot \mathbf{v}_d \qquad B_k \equiv \mathbf{u}_k \cdot \mathbf{h}_d$$

$$C_k \equiv \mathbf{u}_k \cdot (\mathbf{v}_0 - \mathbf{h}_0) \boxed{= 0}$$

常にゼロ

$$\Downarrow$$

$$\mathbf{M}\,\mathbf{g} = \mathbf{0}$$

$\mathbf{g}$ にはスケーリングの曖昧性が残る

GOS2P(2プロジェクタ)の場合:
l_hとl_vを「ねじれの位置」に置く→縮退を回避

パラメータ推定のための線形解法

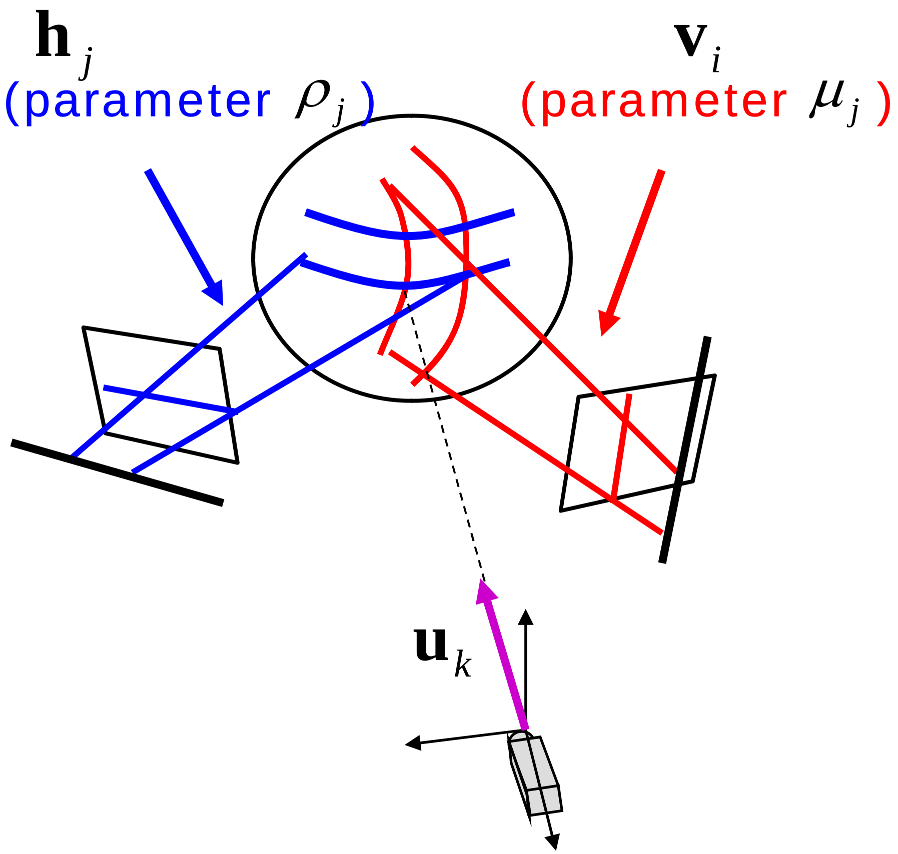
$$A_k \mu_i - B_k \rho_j = C_k$$

$$\mathbf{M}\,\mathbf{g} = \mathbf{c}$$

$$\mathbf{g} \equiv \left[\ \mu_1\ \mu_2\ \cdots\ \ \rho_1\ \rho_2\ \cdots\ \right]^T$$

$\mathbf{c}$　は非零の定数

唯一解が存在



GOS2Pの利点：細い観測対象の復元

- GOSとGOS2Pをもちいた手の形状復元

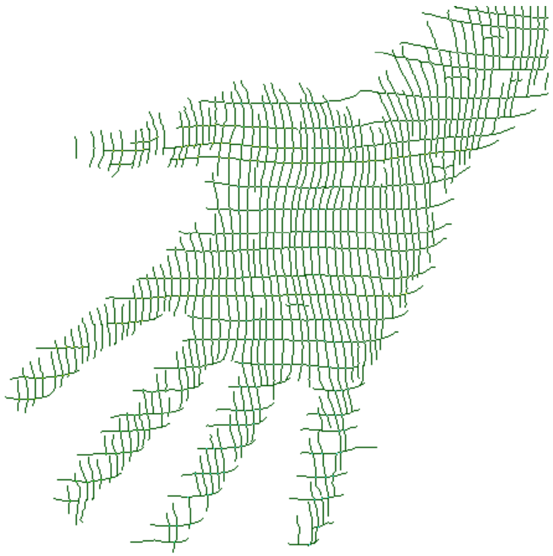
GOS

GOS2P

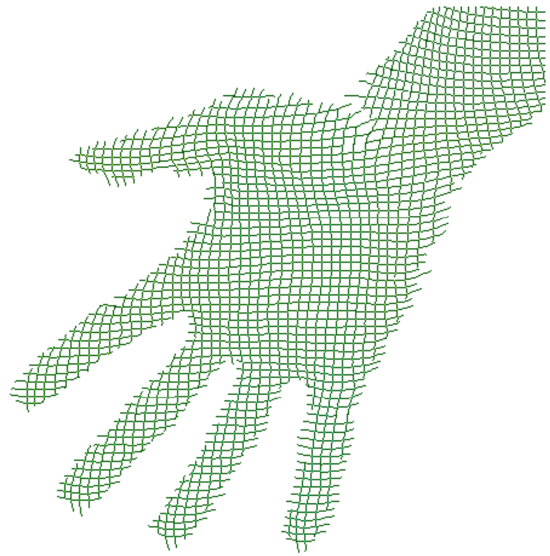
入力画像

GOS2Pの利点:細い観測対象の復元

□ 線検出結果



GOS

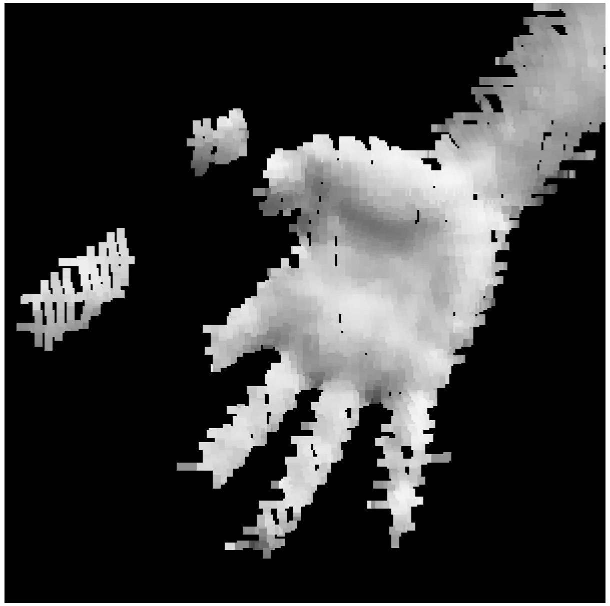


GOS2P

GOS2Pの利点：細い観測対象の復元

□ 形状復元結果

- 高密度パターンの投影により，復元結果を改善

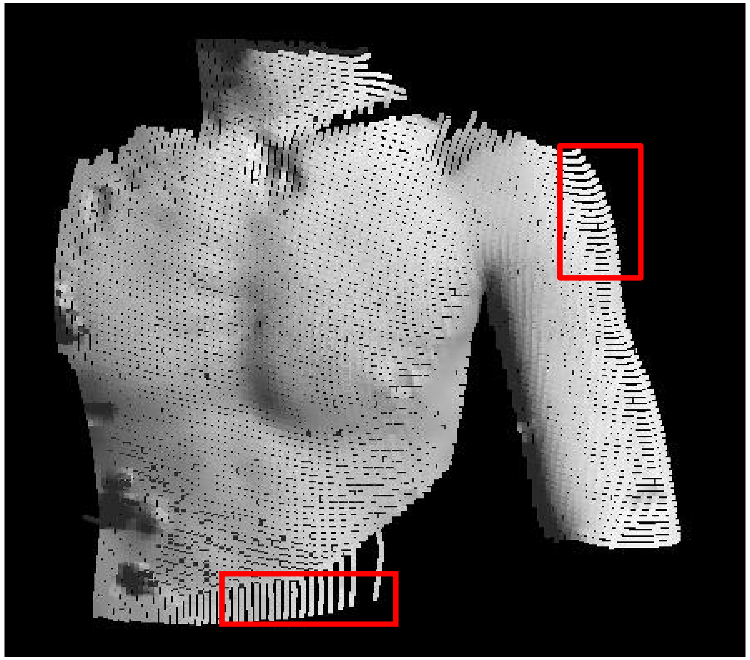


GOS

GOS2P

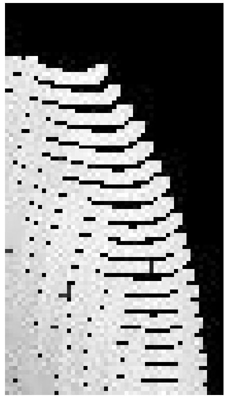
GOS2Pの利点：オクルージョン領域の削減

片方のプロジェクタのみに照明されている領域の
形状復元も可能

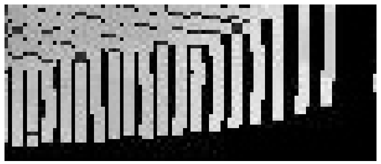


GOS2Pによる結果

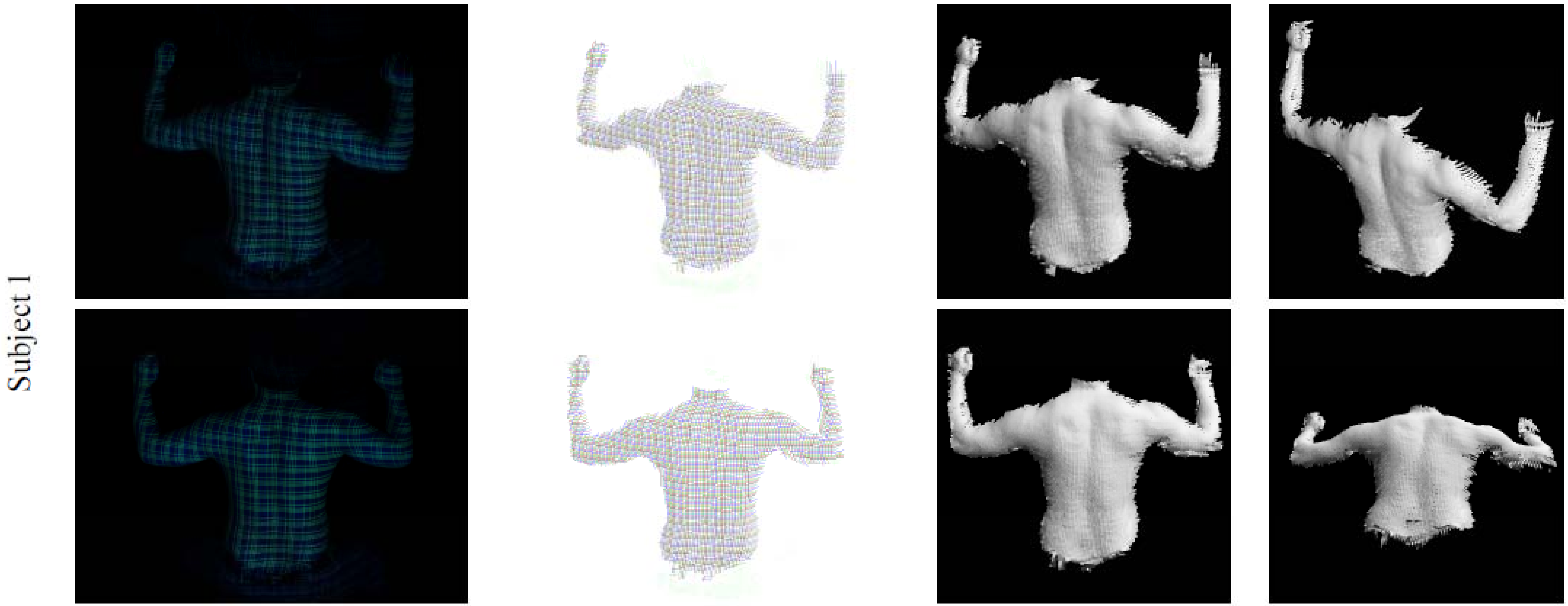
ズーム



ズーム

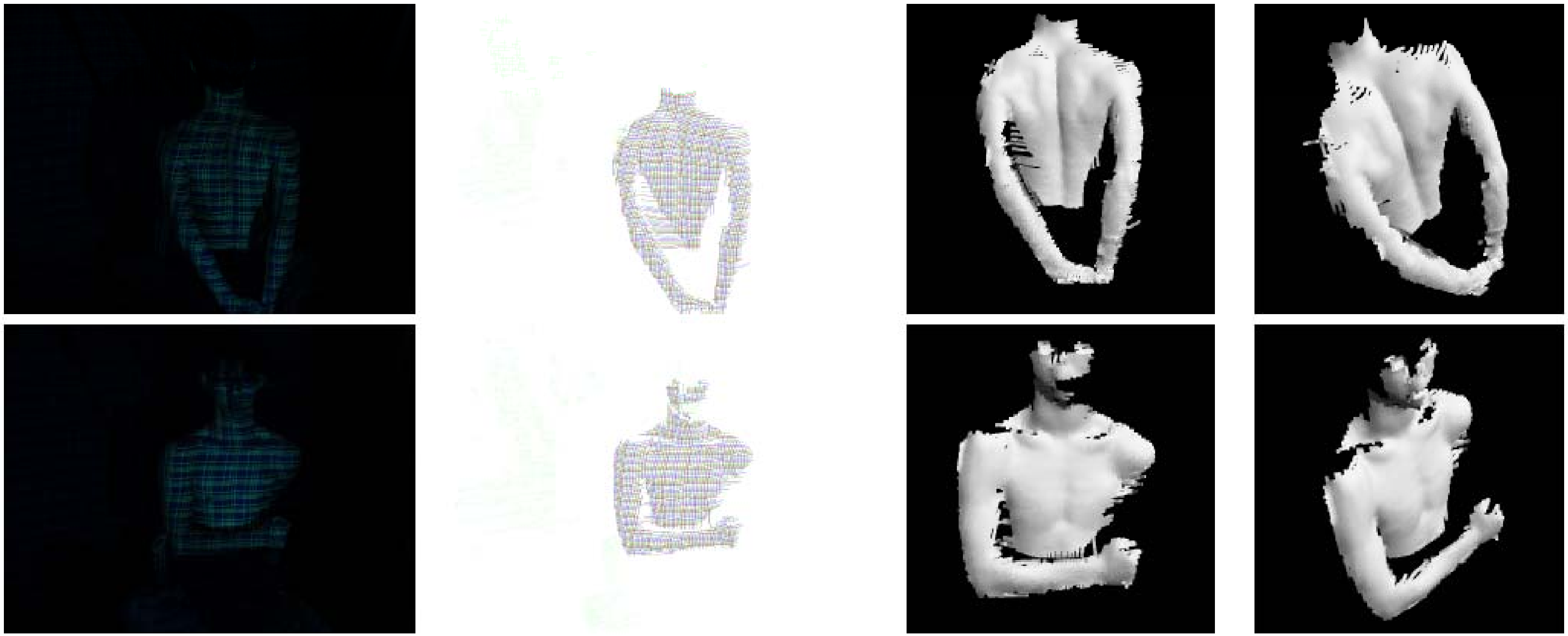


実験例１



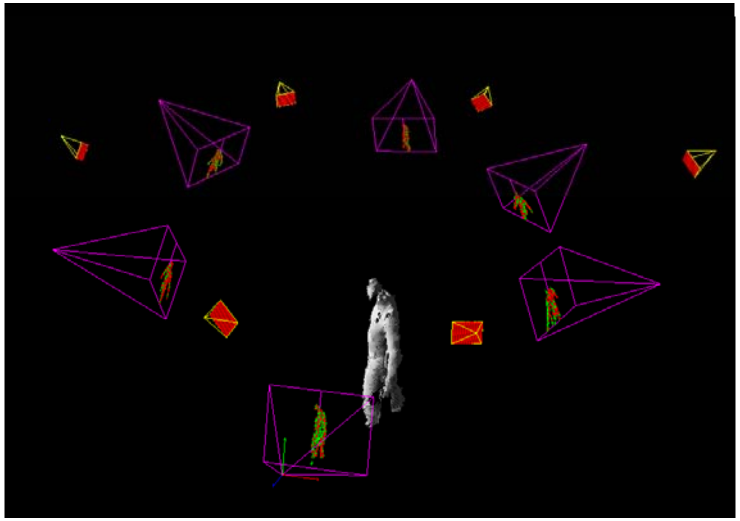
実験例2

Subject 2

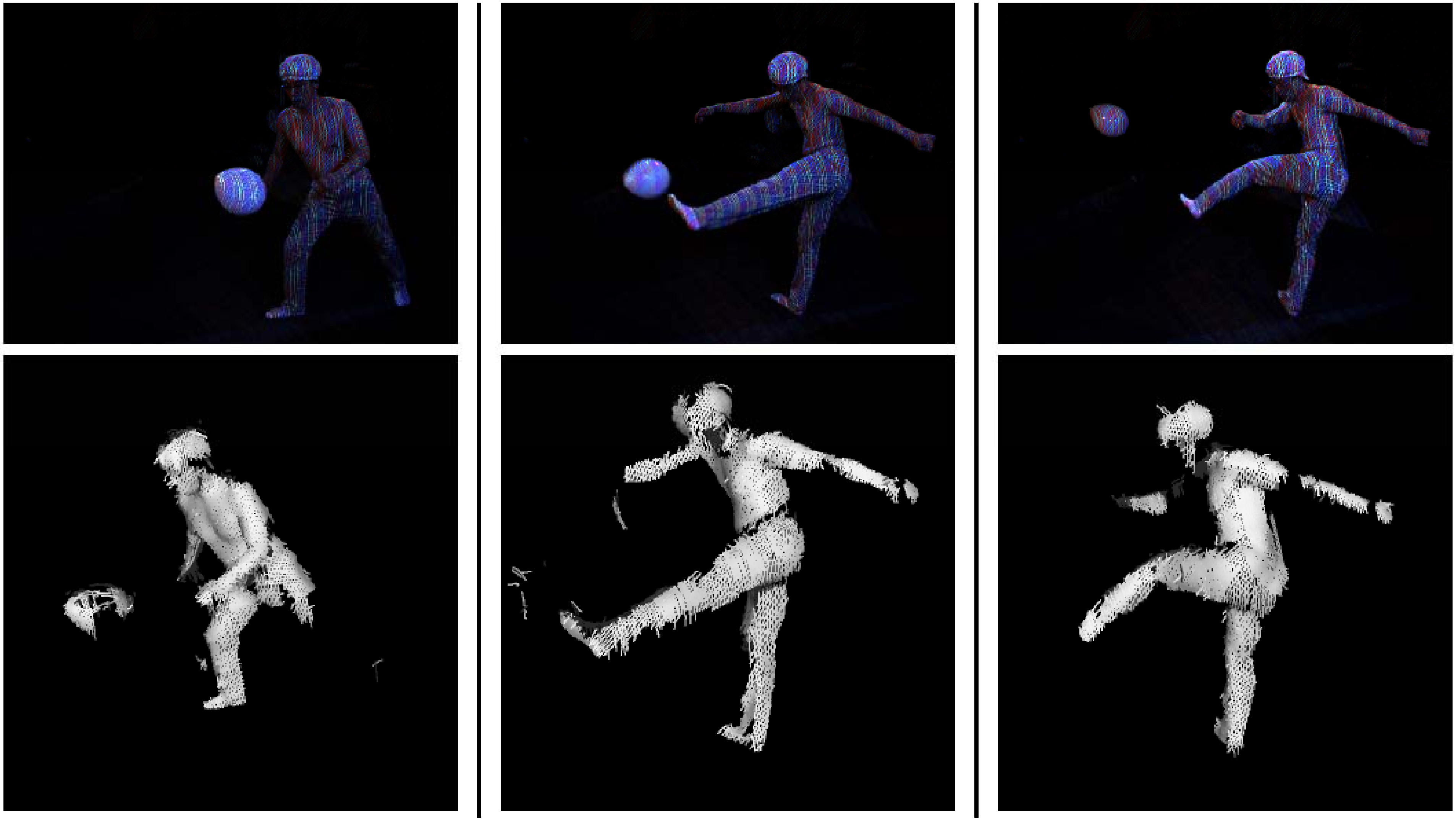


第3のアプローチ

- マルチカメラ＋マルチプロジェクタ
  - 2プロジェクタ版の拡張
  - 異なるカメラ－プロジェクタの組み合わせでグリッドを作る
- 全周計測が可能
  - 6カメラ＋6プロジェクタ



実験例1



実験例2

まとめ

- 密な3次元形状を復元するワンショットスキャン
  - 1カメラ＋1プロジェクタ
  - 1カメラ＋2プロジェクタ
  - マルチカメラ＋マルチプロジェクタ
- 高速な動体の復元が可能
  - 300～32000 fps
  - 風船の破裂
  - ボールのバウンド
  - 人体形状