

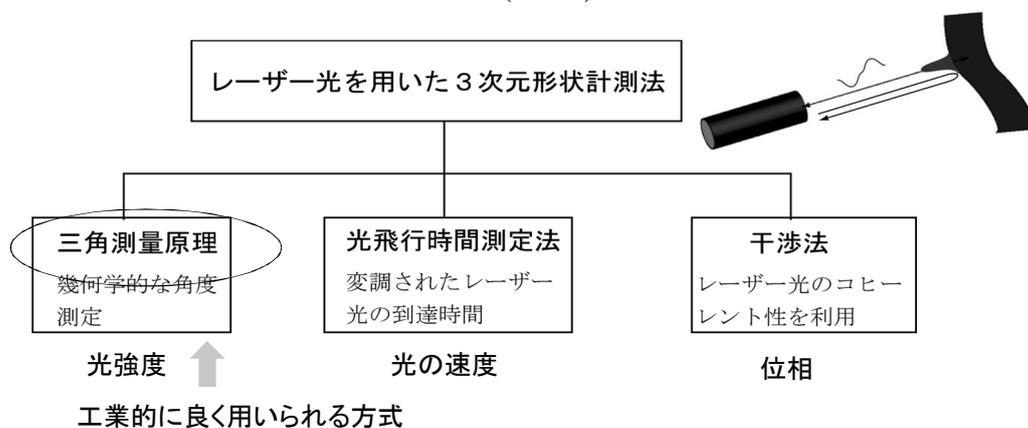
# 表面の反射特性に依存しない光学的3次元形状計測システム

茨城大学 工学部 知能システム学科  
教授 馬場 充

## レーザー3次元計測に利用される光学現象

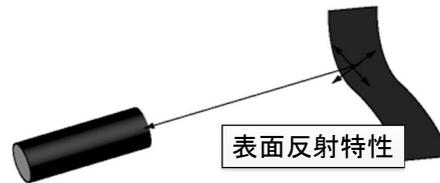
“ 利用される光学現象以下の3種類

光強度, 光の速度, 光の波(位相)の性質

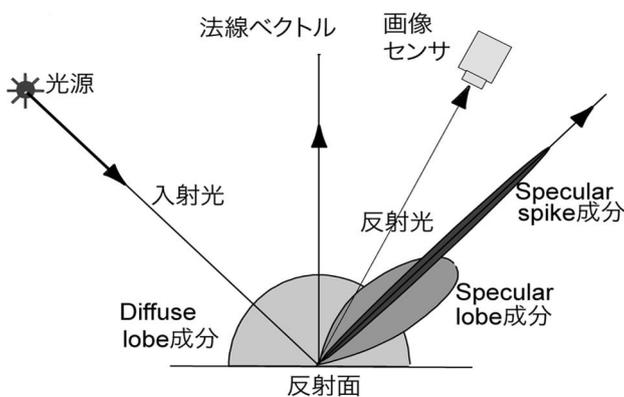


## 三角測量原理の長所と短所

- ” 測定原理：測定対象に対して、レーザー光などの光を投光し、その反射光を画像センサで検知して、幾何学的関係から画像センサと物体までの距離を求めることで物体の3次元形状を測定する。
- ” 長所
  - ・ 測定精度と測定時間のバランスがよい
  - ・ 高信頼性
- ” 短所
  - ・ 適用対象に制限がある(物体の表面反射特性の影響を受けやすい) 不透明な光沢のない対象に限定, 光沢ある物体, 透明体は適用困難



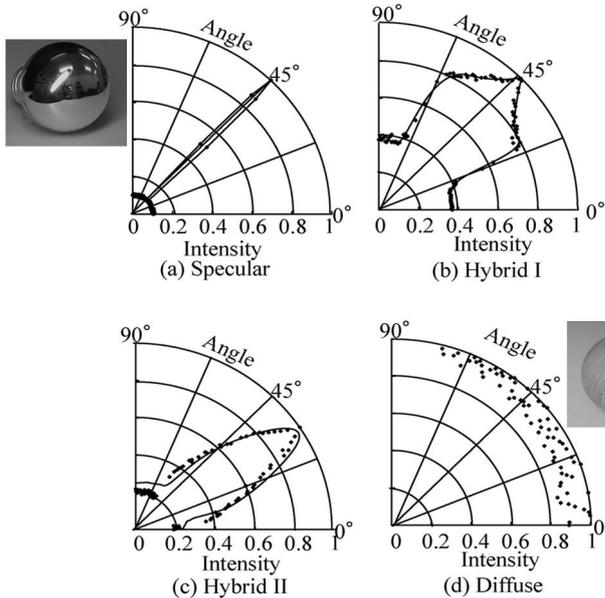
## 物体の光沢とは？



物体の反射特性は物体表面に斜めから光を照射し、反対側からの反射光の強度を測定することで得られる。

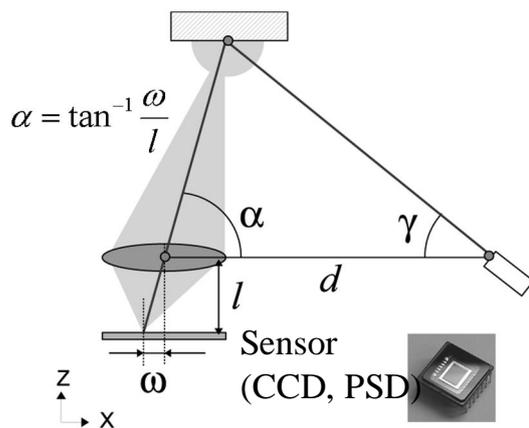
- ” 物体表面の光沢は物体表面の反射特性で表現できる。
- ” 物体の反射特性は3つの成分から成る
- ” diffuse lobe:
  - ・ 半球状に一律の強さで反射
- ” specular spike:
  - ・ 正反射方向に非常に狭い範囲で反射
- ” specular lobe:
  - ・ 正反射方向の比較的広い範囲で反射
  - ・ off-specular peaksの発生

## 実在の物体の反射特性



- ” 通常は3成分が合成
  - ・ diffuse lobe
  - ・ specular spike
  - ・ specular lobe
- 鏡面物体 (**Specular**)
  - ・ specular spikeのみ
- 拡散物体 (**Diffuse**)
  - ・ diffuse lobeのみ
- 中間物体 I (**Hybrid I**)
  - ・ specular spike
  - > specular lobe
- 中間物体 II (**Hybrid II**)
  - ・ specular spike
  - < specular lobe

## 拡散物体への三角測量原理の適用

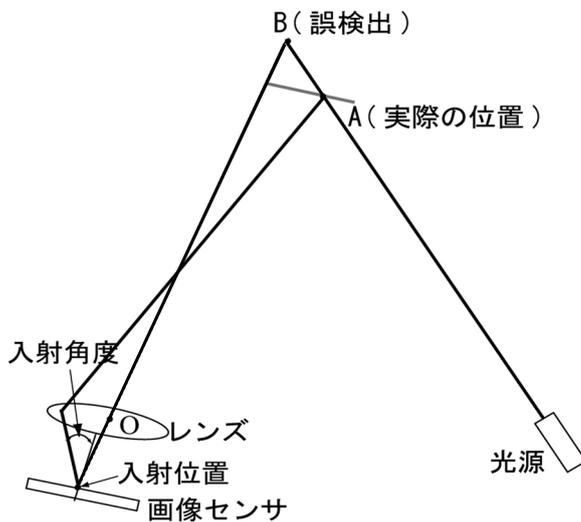


$$x = \frac{d \tan \alpha}{\cot \gamma + \tan \alpha} \quad (1)$$

$$z = \frac{d}{\cot \gamma + \tan \alpha} \quad (2)$$

- ” 拡散物体では, diffuse lobeが支配的なため, スリット光が表面で拡散反射
- ” 拡散反射した光をレンズで集光して, 画像センサで画素位置を検出
- ” 物体の傾きは無関係

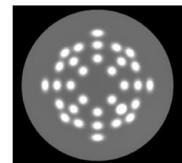
## 鏡面物体に三角測量原理が適用できない理由とその解決策



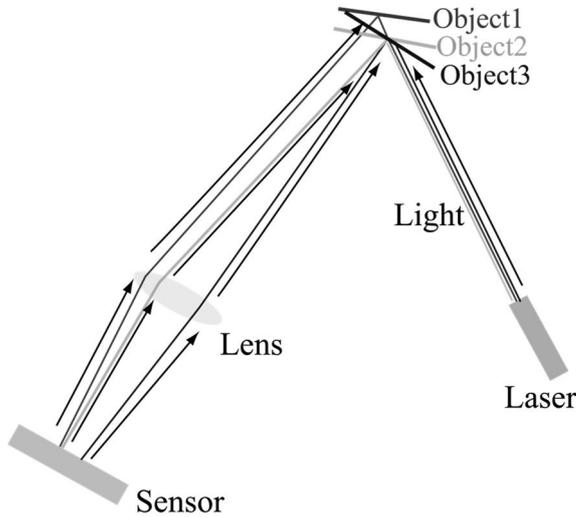
- “ 鏡面物体ではspecular spike が支配的のため、反射光は正反射する.
- “ 反射光がレンズ中心を通らない,
- “ 通常三角測量式は拡散物体を想定しているため、実際の位置A点をB点であると誤検出

## 鏡面物体に対する従来技術の分類と問題点

- “ 従来技術(1)：偏光フィルタを用いて鏡面反射成分をカットし、拡散成分のみを計測に利用
  - ・ 問題点: 鏡面成分が支配的な物体に対して適用困難
- “ 従来技術(2)：一定パターンを物体に投影して、その反射パターンの変形を解析して、法線ベクトルを求める.
  - ・ 問題点: 鏡面反射成分の弱い物体には適用困難. 物体までの絶対距離が分からない.



## 本技術による鏡面物体の形状計測の考え方



センサへの光線の入射ベクトルをもとに物体に投光された光線を幾何光学理論に基づき逆追跡する。

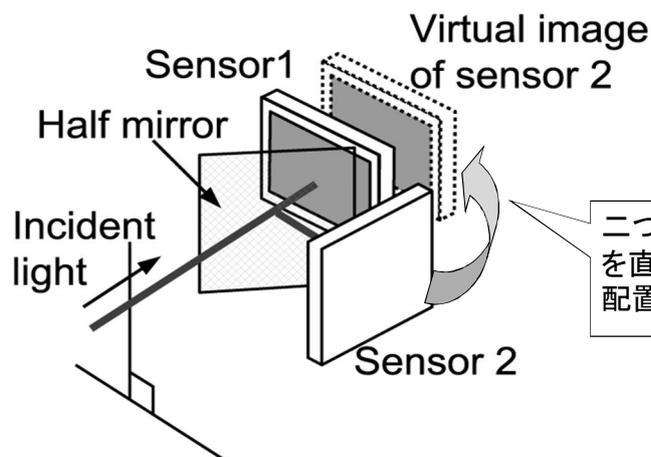


解決すべき技術課題

- (1) センサへの光線の入射ベクトルを検出できるセンサの開発
- (2) 逆光線追跡に基づく形状計測のための新三角測量式の考案

## 新開発の入射ベクトル検出センサの構成

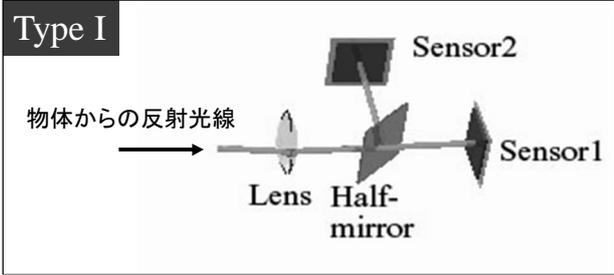
基本構成



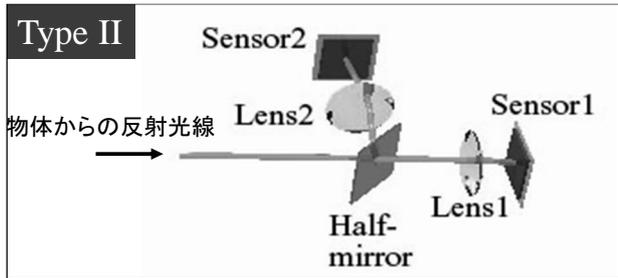
センサは  
2次元CCDセンサ  
または2次元  
PSDセンサのど  
ちらでも良い

二つのセンサ  
を直交させて  
配置.

# 光学系の構成



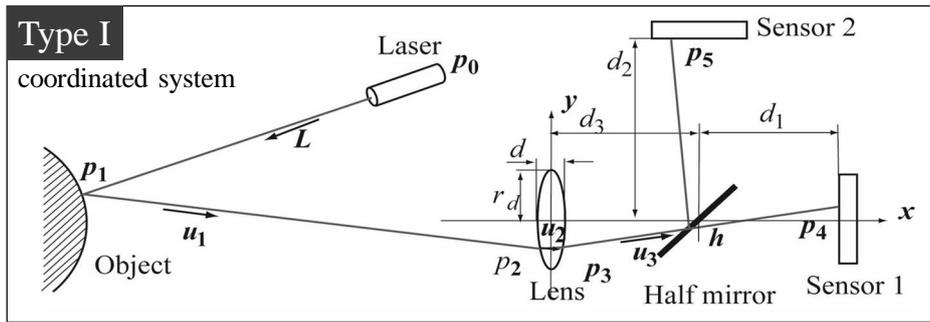
- É凸レンズ
- Éハーフミラー
- É2個のイメージセンサ



- Éハーフミラー
- É2個のレンズ
- É2個のイメージセンサ

11

# type I の入射ベクトル検出方法



- ✓ Halfmirror position,  $h$ , incident position onto the sensor 1 and sensor 2,  $p_4$  and  $p_5$

$$h = (h_x, h_y, h_z)$$

$$p_4 = (p_{4x}, p_{4y}, p_{4z}), \quad p_5 = (p_{5x}, p_{5y}, p_{5z}) \quad (3)$$

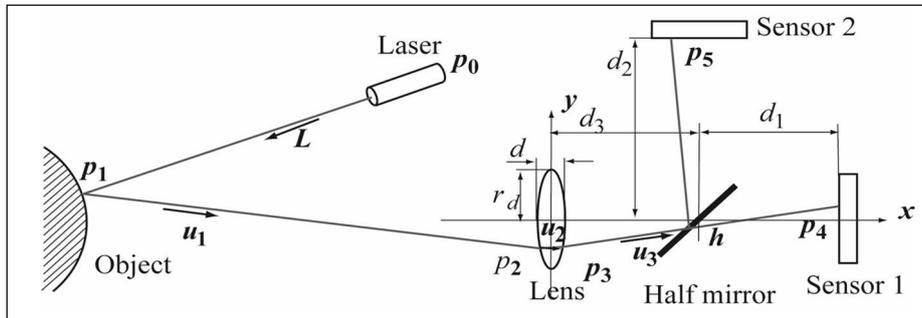
- ✓ Incident direction to the halfmirror,  $u_3$

$$u_3 = (d_1 - d_2, p_{5x} - p_{4x} + h_y - h_x, p_{5z} - p_{4z}) \quad (4)$$

12

12

## type IIにおける新三角測量式



- ✓ The laser position,  $p_0$ , the projection direction,  $L$  and the reflected position onto the lens  $p_2$

$$p_0 = (p_{0x}, p_{0y}, p_{0z}), \quad L = (L_x, L_y, L_z)$$

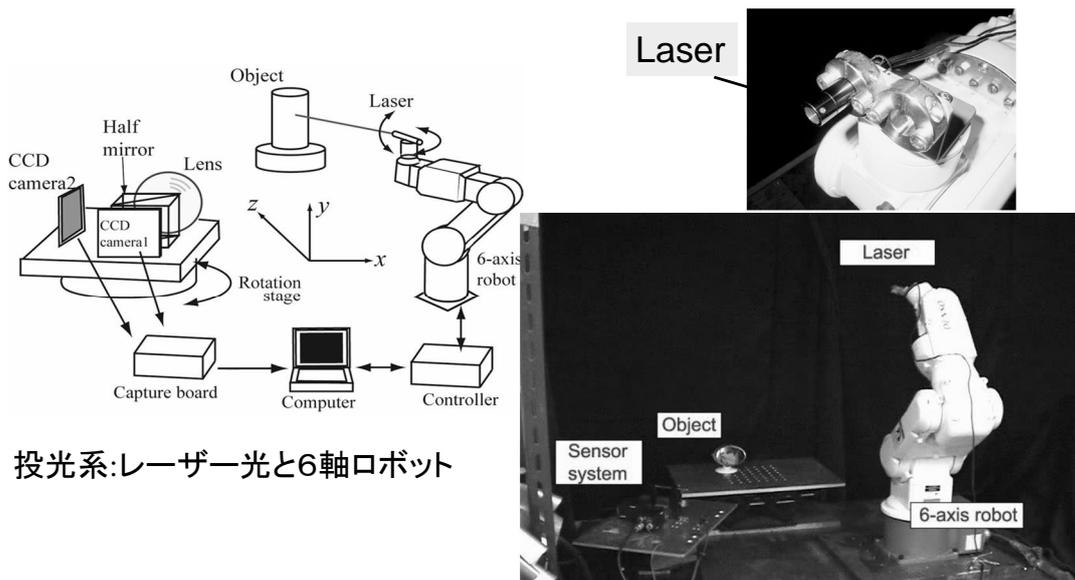
$$p_2 = (p_{2x}, p_{2y}, p_{2z}) \quad (16)$$

- ✓ As a result,  $p_1$  is estimated.

$$p_1 = p_2 + \frac{L_y(p_{2x} - p_{0x}) - L_x(p_{2y} - p_{0y})}{u_{1y}L_x - u_{1x}L_y} u_1 \quad (17)$$

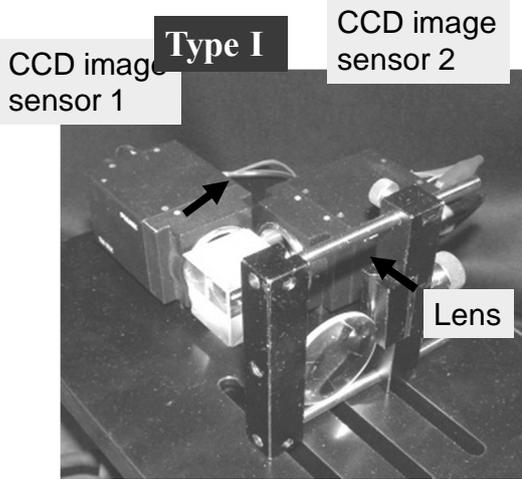
13

## 試作した3次元計測システム



14

## 試作したセンサ



Half mirror:  
立方体形状,  
30mm x 30mm x 30mm

### CCDの仕様

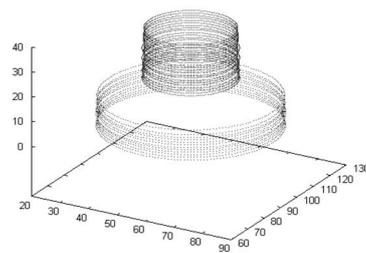


受光面:  
(W)640 × (H)480 pixel  
画素サイズ:  
(W)8.4 μm × (H)9.8 μm

15

## 鏡面物体の測定例

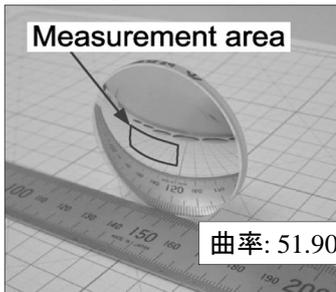
### 金属部品



現在の測定精度は  
0.5mm程度

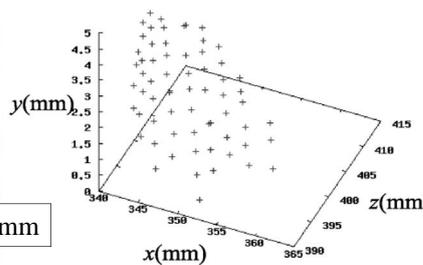


### 凸面鏡



曲率: 51.90mm

(a) Object



(b) Measurement result

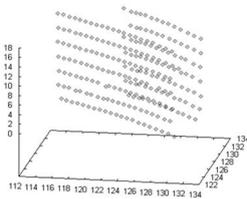
原理検証のための  
システムであり, 測  
定精度, 測定時間に  
ついては考慮してい  
ないため

16

## 透明物体の3次元形状測定結果例



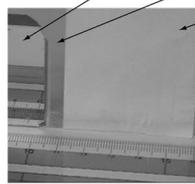
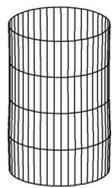
透明平板の測定例



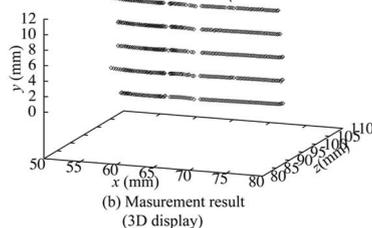
透明な物体に対しても適用可, また, 同一物体上に透明体を含む種々の反射特性を示す表面が混在しても適用可



透明円柱の測定例



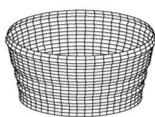
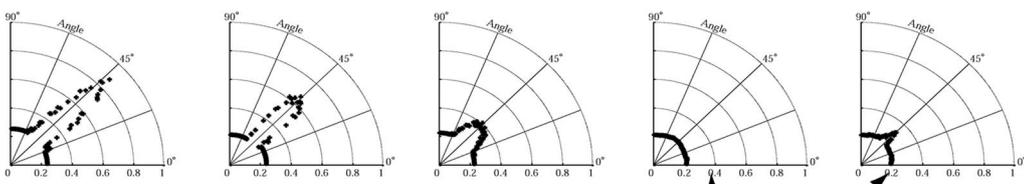
(a) Measured object (Transparent acrylic plate)



(b) Measurement result (3D display)

鏡面・透明・拡散平板が混在した場合の測定例

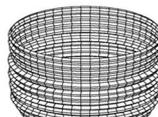
## 種々の反射特性を示す物体の3次元形状測定結果



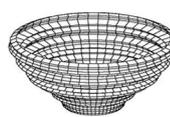
(a) Kinpai



(b) Aritayaki



(c) Bizenyaki



(d) Igaoribe

鏡面物体から拡散物体まで種々の反射特性を有する物体の3次元形状計測に適用可

## 本技術のアイデアのポイント

- “ 従来のレーザー計測技術では、用いる画像センサが入射位置だけであったので鏡面物体では、三角測量式を満たす幾何学的条件が満たされていなかった。その結果、金属などの光沢の強い鏡面物体には適用できなかった。
- “ 本技術は画像センサへの入射ベクトルを用いて、幾何光学を適用することで投光された光線を逆追跡し、鏡面物体に適用可能な新三角測量式を考案した。
- “ 幾何光学を用いた逆光線追跡を行っているので、レンズの収差を含めた解析をしている。その結果、システムの光学系が単レンズで済むために、システムの低コスト化、コンパクト化が可能となる。
- “ 逆光線追跡を可能にするための入射ベクトルを検出できるセンサの開発を行った。

19

## 新技術の特徴・従来技術との比較

- “ 完全鏡面反射面から完全拡散反射面まで、その中間的反射特性を含む物体に対して、同一原理、同一装置で3次元形状が測定できる。透明物体にも適用できるため、測定対象に対する制約がほとんどない。
- “ 測定目的、測定対象に応じて、システムの構成を自由にカスタマイズが可能である。
  - ・ 測定時間の短縮      センサ系にPSDセンサを利用
  - ・ 測定環境を考慮      センサ系にCCDセンサを利用
  - ・ 大寸法対象への適用      投光系の工夫
- “ 既存の投光系が使用できる。光学系とセンサ系を交換すればよい。
- “ 理論的に誤差が0であるアルゴリズムであり、誤差要因の検討がしやすい。

20

## 想定される用途・業界

### 用途

量産プロセスにおける形状評価: 工業製品／部品検査, 設計データとの比較

- “ CG/CAD入力支援: 既存部品を利用した新規部品の設計、クレーモデルからの CAD入力
- “ リバーズエンジニアリング: 試作品の形状・寸法データを設計図面への反映

### 業界

計測器メーカー

- “ 金属加工品メーカー
- “ 自動車部品メーカー
- “ 機械製造メーカー
- “ その他, 製品の形状・寸法検査について課題を持っているメーカー

21

## 実用化に向けた課題・企業への期待

### 実用化へ向けた課題

- “ 本技術の3次元形状計測の基本権利の有効性は実験室のプロトタイプにより実証している.
- “ 実用化のためには利用現場で要求される計測精度の向上と計測時間の短縮の検討.
- “ 既存部品を使用した製作コストの削減策.

### 企業への期待

- “ 関連業界で要望が多い高精度化のために必要な精密光学系と精密駆動系が製作できる企業との共同研究を要望している.
- É 3次元形状計測技術の導入を考えている企業あるいは3次元レーザ計測に関して何か問題を抱えている企業は是非ご相談いただきたい.

22

## 本技術に関する知的財産権

- 〃 発明の名称 : 光学式3次元形状計測装置及び光学式3次元形状計測方法
- 〃 出願番号 : 特願2009 275592
- 〃 出願人 : 茨城大学
- 〃 発明者 : 馬場 充

※特許出願から1.5年未満の未公開特許情報を含んだ説明会ですので、情報の取り扱いに十分ご注意ください。公開する情報の範囲につきましては、特許出願人(知財本部、TLO等)とご相談ください。

23

## お問い合わせ先



国立大学法人 茨城大学  
産学官連携イノベーション創成機構  
■技術相談 友田和美  
■知財・技術移転 園部浩

TEL: 0294-38-5057

FAX: 0294-38-5240

e-mail: 4u@ml.ibaraki.ac.jp

24