

ダイレクトドライブモータを用いた 計測範囲の能動的変更が可能な三次元形状計測システムの提案

○井倉 幹大（東京大学），Pathak Sarthak（東京大学），山下 淳（東京大学），浅間 一（東京大学）

Active 3D Sensing System Based on Variable Measurement Area Using Direct Drive Motor

○Mikihiro IKURA (Univ. of Tokyo), Sarthak PATHAK (Univ. of Tokyo),
Atsushi YAMASHITA (Univ. of Tokyo), and Hajime ASAMA (Univ. of Tokyo)

Abstract : Many kinds of 3D sensing devices have been commercially available and have been utilized in many fields recently. However, as conventional systems in which 3D sensing devices are utilized, the measurement area and the spatio-temporal resolution are fixed based on the attached 3D sensing devices. Then, the fixed specification restricts achievable measurement tasks. This research aims at the 3D sensing system that can actively change the measurement area according to the surrounding environment. The proposed 3D sensing system realized not only 360 degrees around sensing but also local sensing measuring a focused area at high spatio-temporal resolution. In the experimental setup, we evaluated the improvement the spatio-temporal resolution by focusing the measurement area.

1. 緒言

三次元形状計測は、実環境における空間的な広がりやその時間変化を機械が認識するために必要な技術である。そのため、ロボティクスや製造業など様々な分野で三次元形状計測の技術は利用されている [1, 2]。そして近年では、様々な種類の三次元形状計測センサ [3, 4] が市販されるようになり、より簡単に三次元形状計測の技術を利用できるようになった。市販されている三次元形状計測センサの大半は、三次元形状計測の時空間分解能や計測範囲は一定で、安定した計測結果を出力する。

このような三次元形状計測が可能なセンサを簡単にシステムに導入できるようになったことで、システムに求められるタスクがより複雑になりかつ増加した。三次元形状計測についても同様で、全周囲を計測し周囲環境を認識するタスク [5] もあれば、局所的な領域を重点的に高時空間分解能で計測し続けるタスク [6, 7] も求められるようになった。しかし、システムによって空間配置や電力など様々な制約があるため、搭載できるセンサや計測装置の数も限定される。そのため、多数のセンサや計測装置をシステムに搭載することで、複数のタスクを1つのシステムで実現できるとは一概に言えない。

そこで本研究では、一方では360度全周囲を計測でき、他方では計測範囲を絞ることで局所領域を高時空間分解能で計測できるような、計測範囲を能動的に変更できる三次元形状計測システムを提案する。計測範囲を能動的に変更することで、周囲環境に応じて、複数の三次元形状計測のタスクを1つのシステムで実現することができる。また、局所領域を高時空間分解能で計測することで、計測対象との相対位置姿勢が変動しても、その変動を認識することが

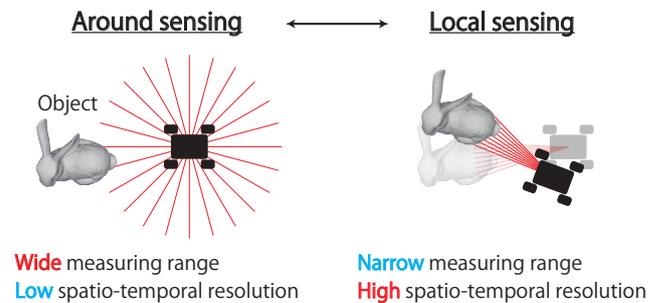


Fig. 1: Task scenario of proposed 3D sensing

できる。その結果、位置姿勢変化の変動を打ち消すように計測範囲を変更し、計測対象を追従することで常に計測対象を高時空間分解能で計測することができると考えられる。

本研究で提案する三次元形状計測システムでは、三次元形状計測の手法として光切断法 [8] を採用する。光切断法では、照射するラインレーザの方向を制御することで計測範囲や計測の時空間分解能を制御できるため、提案システムに適している。今回、ラインレーザの照射方向はダイレクトドライブモータを用いて制御し、高速カメラで画像を取得して、光切断法に基づく高速な三次元形状計測を実現する。提案システムを用いたタスクの一例を図1に示す。まず、ダイレクトドライブモータを高速に回転させ、取り付けられたラインレーザを360度全周囲に走査する。そして全周囲の走査中に、計測結果や取得画像を基に、計測対象の方向周辺を高速に往復するようにダイレクトドライブモータの動作を切り替える。計測範囲を全周囲から計測対象周辺に絞ることによって、その計測範囲に対して高時空間分

解能で計測することができる。そして、計測対象を高時空間分解能で計測し続けるために、計測対象との相対位置姿勢の変動に応じて、ダイレクトドライブモータの角度を適応的に変更する。

2. 関連研究

2.1 高速な三次元形状計測

近年、高速カメラを用いた高速な三次元形状計測が実現されるようになった [7, 9]。田畑らは、2つの高速カメラとプロジェクタを用いて、構造化光法による 500 fps のリアルタイムの三次元形状計測を実現した [9]。このシステムでは、プロジェクタでセグメントパターンを照射し、2つのカメラから得られたパターンが写った画像とエピポーラ制約を用いることで、計測対象上の三次元点群が 500 fps で計測される。また並木らは、高速カメラとプロジェクタで構成された構造化光法に基づく三次元形状計測システムを、2軸のパンチルトロボットに搭載することで、500 fps の高速三次元形状計測をパンチルトロボットで向けた方向に適用できるシステムを提案した [7]。このシステムにより、高速に三次元形状計測を行い、その結果を用いて計測対象をトラッキングすることで、計測対象の位置姿勢を 500 fps で取得できるようになった。しかしこれらのシステムは物体を高速に計測することができるが、プロジェクタで照射するパターンによって計測時の空間分解能が一定になる。加えて、田畑らのシステムではプロジェクタで照射する範囲に計測範囲が限定されている。また、並木らのシステムはパンチルトロボットによって計測可能領域が拡大されたが、搭載されている三次元計測システムの慣性が大きいので、パンチルトロボットを高速に動作させ、計測範囲を常に高速に変化させることが難しい。

そこで本研究では、ダイレクトドライブモータによって照射方向を制御したラインレーザを用いて、光切断法に基づく三次元形状計測を行う。撮像に高速カメラを用いることで、高速に三次元点群が取得できる。また、回転させるラインレーザの慣性を小さくすることで、高速に照射方向を制御することができる。これによって、計測の時空間分解能と計測範囲を能動的に変更することができる。

2.2 適応的な三次元形状計測

従来の三次元形状計測システムでは、計測の時空間分解能や計測範囲はシステムに応じて一定で時間変化しなかった。これに対し、永井らは広い視野角の 3D LIDAR を回転装置に取り付け、回転速度を制御することで計測の時空間分解能を適応的に変化させるシステムを提案した [10]。このシステムでは、取得した全周囲の点群を用いて周囲環

境の凹凸を評価し、評価結果に応じて計測の注視領域を決定する。その後、注視領域では LIDAR を低速に回転させ、残りの領域では高速に回転させることで、注視領域を相対的に高い空間分解能で計測できる。しかしこのシステムは計測範囲が全周囲で一定であるため、計測の空間分解能と時間分解能のトレードオフになる。そのため、時間分解能と空間分解能の両方を向上させるのは難しい。

これに対し、本研究ではダイレクトドライブモータを用いてラインレーザの照射方向を制御し、三次元形状計測を行う。ダイレクトドライブモータは回転時の角速度を適応的に制御することができ、かつバックドライブも可能である。そのため、永井らのシステムのような全周囲計測における時空間分解能の制御に加えて、局所領域に計測範囲を絞った高時空間分解能での計測も可能であると考えられる。

3. システム構成

3.1 システム全体概要

三次元形状計測を行うシステムにおいて、空間分解能 S 、時間分解能 T 、計測範囲 A はトレードオフの関係にあり、以下の式で関係づけられると考えられる。

$$S \times T \times A = \text{Const.} \quad (1)$$

例えば、全方位 LIDAR は計測範囲 A を 360 度全周囲にしている分、時間分解能は小さくなる。一方計測範囲が全周囲と比べて小さい LIDAR は、その分全方位 LIDAR と比べて時間分解能が大きくなる。本研究では、このトレードオフ関係に基づいて、計測の時空間分解能と計測範囲を状況に応じて変更可能な三次元形状計測システムを提案する。本研究で提案するシステムは、魚眼レンズを取り付けた高速カメラ、ダイレクトドライブモータ、ラインレーザで構成される。提案するシステムの概要図を Fig. 2 に示す。また、提案システムの処理の流れを Fig. 3 に示す。まず高速カメラを用いて、照射されたラインレーザの輝点群が写る画像を取得する。そして取得画像に光切断法の処理を適用して三次元形状計測を行う。ここで、ラインレーザを照射する方向をダイレクトドライブモータを用いて制御することで、全周囲または局所領域を計測することができる。本研究では、計測範囲を変更するためのトリガーとして、取得画像に対して AR マーカの検出結果を用いる。計測対象に貼ってある AR マーカが検出された際に、計測範囲を全周囲から局所領域に切り替える。具体的には、高速に回転させているダイレクトドライブモータを、AR マーカが検出された方向を中心に往復させるように制御を切り替える。このように、提案システムでは、全周囲を計測することと、局所領域を重点的に計測することの両極端の計測を実現す

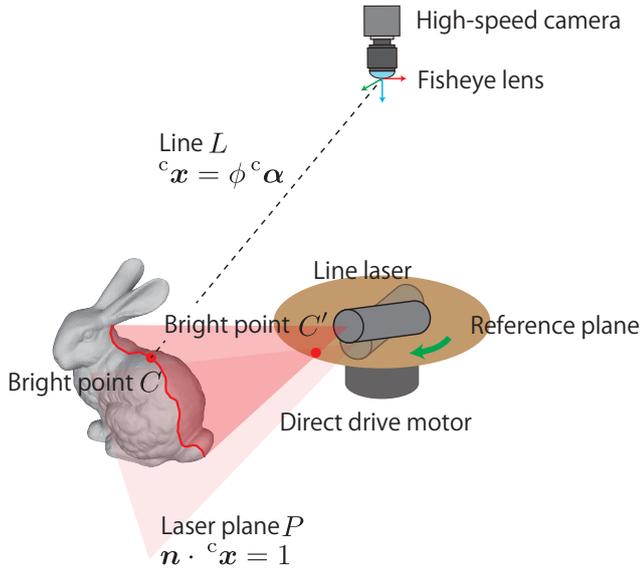


Fig. 2: Overview of proposed 3D sensing system

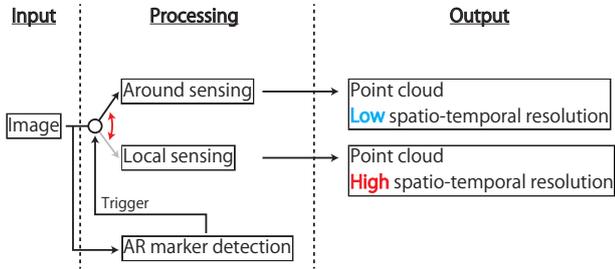


Fig. 3: Flow diagrams of proposed system

ることができる。計測範囲を能動的に絞ることで、局所領域を高い時空間分解能で計測することができる。

3.2 光切断法に基づく適応的三次元形状計測

本研究では、高速カメラとラインレーザを用いて光切断法に基づいた三次元形状計測を行う。また、ダイレクトドライブモータにラインレーザを取り付けて、ラインレーザの照射方向を制御し、計測範囲を適応的に変更する。高速カメラで取得される画像の概要を Fig. 4 に示す。画像中には、中心にダイレクトドライブモータに取り付けて回転しているラインレーザ、周囲に照射しているレーザの輝線が表示される。ある瞬間において、ラインレーザの輝線を構成する輝点 C の三次元座標 ${}^c \mathbf{x}_c$ は、輝点 C の画像座標 $({}^i u_c, {}^i v_c)^T$ とその瞬間のラインレーザの平面 $\mathbf{n} \cdot \mathbf{x} = 1$ の幾何関係を用いて計算することができる。今回、ダイレクトドライブモータを用いてラインレーザを回転させるので、高速カメラとラインレーザの幾何関係は常に変化する。そのため、提案システムでは常にある瞬間のラインレーザの平面の法線ベクトル \mathbf{n} が求められるようにキャリブレーション

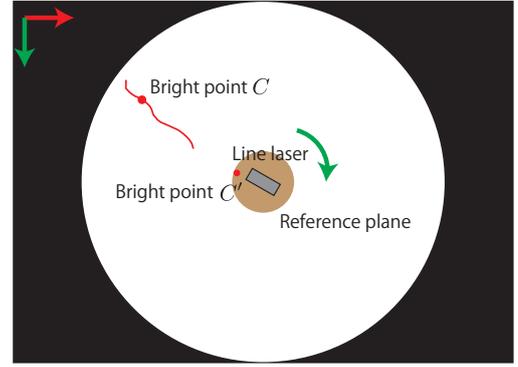


Fig. 4: Overview of obtained image from high-speed camera

ションを行う。

提案システムのキャリブレーションにおいて、ある瞬間のラインレーザの平面の法線ベクトル \mathbf{n} が常に求められるように、ダイレクトドライブモータに固定した円形の参照面に写る輝点 C' の画像座標 $({}^i u_{c'}, {}^i v_{c'})^T$ を用いる。ラインレーザの一部が、回転中常に参照面に写るように設置すると、ダイレクトドライブモータの回転に応じて輝点 C' の画像座標も変動する。今回のキャリブレーションでは、この輝点 C' の画像座標とラインレーザの平面の法線ベクトル \mathbf{n} の一対一対応の関係を利用する。具体的なキャリブレーション手順は、まずチェッカーボードを様々な位置姿勢で撮像し、魚眼レンズを搭載した高速カメラの内部パラメータを Zhang の手法 [11] に基づき計算する。次に方向を固定したラインレーザをチェッカーボードに照射した画像を複数取得し、計算した内部パラメータを用いてチェッカーボード上の輝点群のカメラ座標系における三次元位置を計算する。そしてこの輝点群を平面フィッティングして、固定したラインレーザの平面の法線ベクトル \mathbf{n} を求める。これと同時に、このラインレーザの平面に対応する参照面上の輝点 C' の画像座標も計算する。以上の処理をラインレーザの照射方向を変えて繰り返すことで、ラインレーザの平面の法線ベクトル \mathbf{n} と輝点 C' の画像座標 $({}^i u_{c'}, {}^i v_{c'})^T$ の対応が複数求まる。最後にこの対応関係を多項式関数 $\mathbf{n} = \mathbf{f}({}^i u_{c'}, {}^i v_{c'})$ に回帰させる。以上により、画像を取得することで、その瞬間のラインレーザの平面の法線ベクトル \mathbf{n} を求めることができる。

このキャリブレーション結果を用いて、ラインレーザの輝点 C のカメラ座標系における三次元位置 ${}^c \mathbf{x}_c$ は以下の式を連立することで求まる。

$$\begin{cases} {}^c \mathbf{x}_c &= \phi^c \boldsymbol{\alpha} \\ \mathbf{n} \cdot {}^c \mathbf{x}_c &= 1 \end{cases} \quad (2)$$

ここで、式 (2) の上式はカメラ座標原点から輝点 C まで結んだレーザ光線の直線 L の式、下式はラインレーザの平

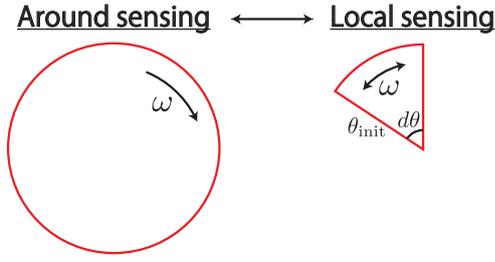


Fig. 5: Control of direct drive motor

面 P の式である. キャリブレーションによって, 直線 L の方向ベクトル ${}^c\alpha$ は輝点 C の画像座標 $({}^i u_c, {}^i v_c)^T$ から, 平面 P の法線ベクトル \mathbf{n} は参照面上の輝点 C' の画像座標 $({}^i u_{c'}, {}^i v_{c'})^T$ から求まる. 連立方程式を解くと, 輝点 C のカメラ座標における三次元位置 ${}^c\mathbf{x}_c$ は,

$${}^c\mathbf{x}_c = \frac{{}^c\alpha}{\mathbf{n} \cdot {}^c\alpha} \quad (3)$$

と求まる.

3.3 ダイレクトドライブモータ制御

ダイレクトドライブモータとは, 減速機構を搭載せず駆動させることを前提にした, 高トルクかつ高精度位置決めが可能なギアレスのサーボモータである. ダイレクトドライブモータは, ギアレスであることでバックドライブが可能になったので, 提案システムのように, 回転運動と高速な往復運動の両方を実現する装置として適していると考えられる. 提案システムにおいて, ダイレクトドライブモータを用いて回転運動と往復運動におけるラインレーザの照射方向の制御を行う. ダイレクトドライブモータ制御の概要を Fig. 5 に示す. まず, 回転速度 ω を指定して回転運動を行う. 次に往復運動への切り替えのトリガを受信すると, 計測対象を重点的に計測するように往復運動を行う. 往復運動を行う際に, 回転速度 ω , 回転開始地点 θ_{init} , 回転量 $d\theta$ を指定する. 往復運動の際, AR マーカの検出結果を基に回転開始地点 θ_{init} を適宜更新することで, 計測対象を追従して計測し続けるようにダイレクトドライブモータが制御される.

4. 実験

4.1 実験環境

提案した計測範囲の能動的変更が可能な三次元形状計測システムの有効性を検証するために, 計測実験を行った. 実験装置の全体図を Fig. 6 に示す. 実験装置は高速カメラ (Optronis, CP70-2-M-1000 @1000 fps), ライ

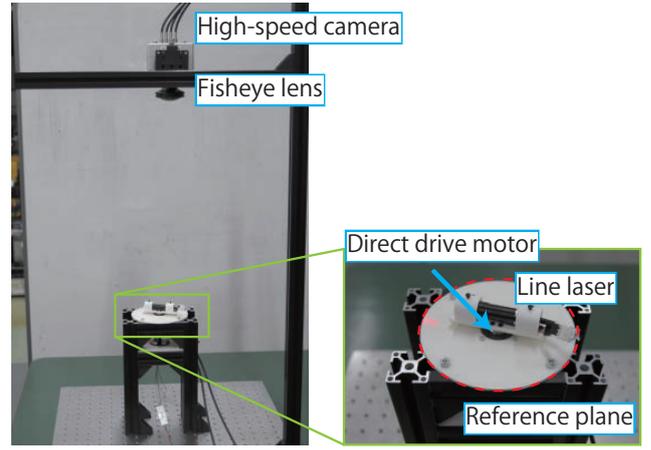


Fig. 6: Experimental configuration of proposed 3D sensing system



Fig. 7: Measured object

ンレーザ (Kikoh Giken, MLXL-D13-660-120), ダイレクトドライブモータ (MTL, MDH-3018-108KE) を用いて構築した. ダイレクトドライブモータのモータドライバ (MTL, MC-200-7220A) に制御信号を送るためにマイコン (mbed NXP, LPC1768) を使用し, 光切断法による三次元形状計測のための画像処理やダイレクトドライブモータの運動切り替えのトリガ送信は PC (Intel Core i9-9900K @3.60 GHz) を使用した.

今回の実験では, 計測対象として Fig. 7 のような板を用意した. また, 本実験において, ダイレクトドライブモータの運動を切り替えるトリガーとして, AR マーカを板に貼りつけた. AR マーカを検出すると, 回転運動から AR マーカがある方向を中心にした往復運動をするように, ダイレクトドライブモータの動作を切り替えるように実装した. 加えて, 適応的三次元形状計測によって全周囲計測から局所領域計測に切り替えることで計測の時空間分解能を向上させる実験として, 全周囲計測時と局所領域計測時のダイレクトドライブモータの制御パラメータを事前に設定した. 全周囲計測時のダイレクトドライブモータの回転運動の回転速度 ω を 500, 回転量 $d\theta$ を 1 周分の 432 にし,

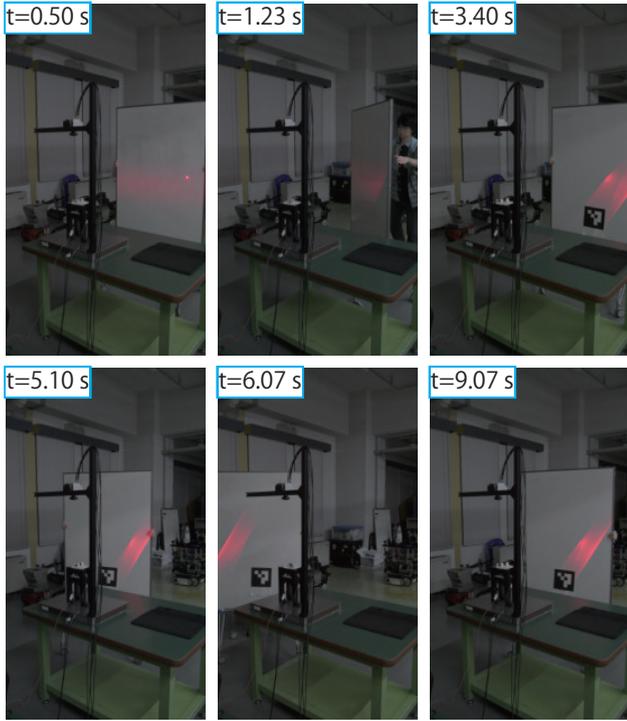


Fig. 8: Demonstration of proposed 3D sensing

局所領域計測時の往復運動の回転速度 ω を 200, 回転量 $d\theta$ を 50 と設定した. また往復運動の回転開始地点 θ_{init} を AR マーカの検出結果を基に逐次更新することで, 往復運動の中心を板の動きに追従させた.

4.2 実験結果

今回行った実験における, 提案システムの動作の様子を Fig. 8 に示す. まず, AR マーカが検出されていない状況では, ダイレクトドライブモータを用いてラインレーザを回転させて全周囲計測をしていることが確認できた ($t = 0.50 - 1.23$ s). その後, 全周囲計測の途中で AR マーカを検出すると, 計測範囲が全周囲から AR マーカがある局所領域に切り替わった ($t = 3.40$ s). そして, ダイレクトドライブモータでラインレーザを往復させることで局所領域を重点的に計測した ($t = 5.10$ s). 加えて, AR マーカがある計測対象を移動させると, AR マーカの移動に対して追従するようにダイレクトドライブモータを制御し, ラインレーザの照射方向が変化している様子が確認できた ($t = 5.10 - 9.07$ s).

この実験における三次元形状計測の結果を Fig. 9 に示す. この三次元形状計測結果は, ダイレクトドライブモータが回転量 $d\theta$ 分だけ動作した間に計測された三次元点群をまとめて出力したものになっている. グラフ上に示されている時刻は, 計測を開始してからの時刻であり, 隣り合うグラフの差分時刻は, ダイレクトドライブモータが回転

Table 1: Improvement of spatio-temporal resolution by adaptive 3D sensing

	Around sensing	Local sensing	Unit
Spatial resolution	114.15	159.25	points/deg
Time resolution	8.10	28.24	scan/s

量 $d\theta$ 分だけ動作するのにかかった時間である. この結果から, AR マーカを検出する前は全周囲計測が行われ, 検出後は AR マーカが貼られている計測対象を重点的に計測している様子が確認できた. 取得された計測対象の三次元点群を確認すると, 局所領域計測時の点群の空間的な密度が, 全周囲計測の時と比較して密になっていた. 加えて, 全周囲計測から局所領域計測に切り替えることで, ダイレクトドライブモータが回転量 $d\theta$ 分動作して計測対象の三次元点群が更新されるのにかかる時間は短縮されていた. すなわち, 計測範囲を全周囲から局所領域に切り替えることで, 計測の時空間分解能が向上していることが本実験で確認できた.

さらに, 取得した計測対象の三次元点群を用いて, 全周囲計測と局所領域計測の時の計測の時空間分解能を計算した. その結果を Table 1 に示す. 空間分解能は, 計測対象周辺の 1 度当たりの計測点数である. また, 時間分解能は, 回転量 $d\theta$ 分の動作を 1 走査としたときの, 1 秒当たりの走査数の平均である. この結果から, 取得した三次元点群からも, 全周囲から局所領域に計測範囲を絞ることによって, 計測の時空間分解能が向上したことが確認できた.

5. 結言

本研究では, ダイレクトドライブモータを用いて, 計測範囲を能動的に変更可能な光切断法に基づく三次元形状計測システムを提案した. ダイレクトドライブモータを用いてラインレーザの照射方向を能動的に制御することによって, 360 度全周囲の三次元形状計測だけでなく, 計測範囲を絞って局所領域を重点的に計測することもできた. そして計測範囲を絞ることで, 局所領域に対し計測の時空間分解能を向上させることができた. さらに, 局所領域計測の際に, 計測対象の相対位置姿勢の変動に応じてダイレクトドライブモータの角度を適応的に変更することで, 計測対象を追従するように計測することが確認できた. 実験では, 計測対象に AR マーカを取り付け, AR マーカが検出されると計測範囲を全周囲から局所領域に切り替える計測を行った. 結果として, 計測範囲を絞ることで計測の時空間分解能が向上したことに加え, 局所領域計測の際に AR マーカの位置を追従するように計測範囲が変化したことが確認でき, システムの有効性が示せた.

今後の課題として, AR マーカの検出の有無をトリガーとして計測範囲の変更を行っていたが, 計測された三次元

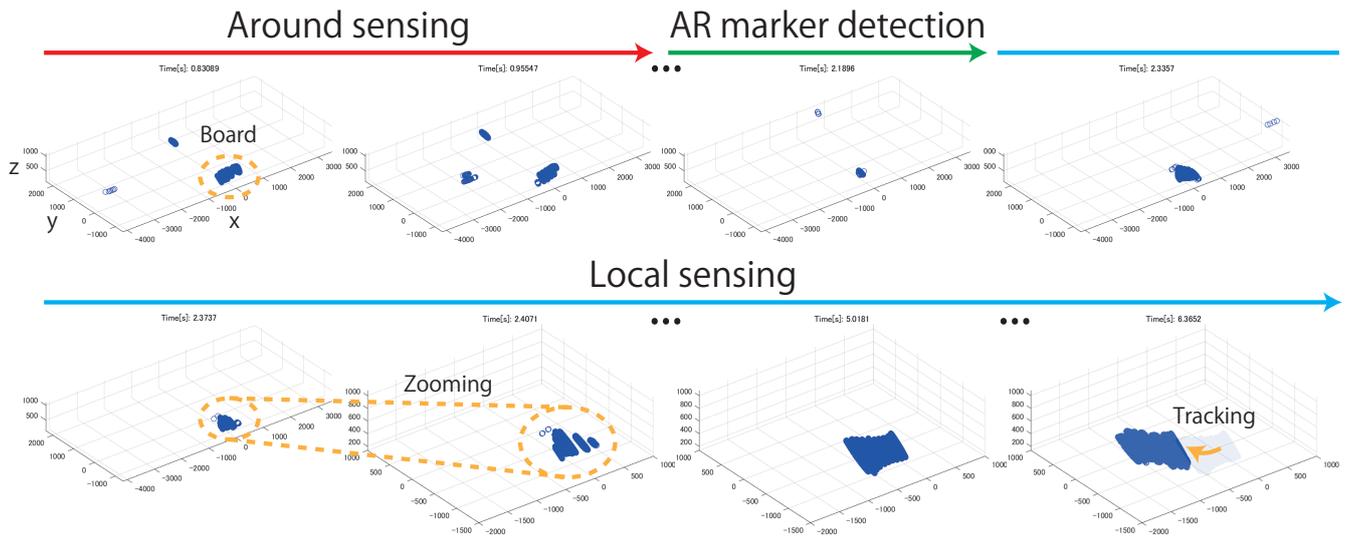


Fig. 9: Time translation of 3D sensing results

点群や取得画像を基に自律的に計測範囲を変更できるようにシステムを拡張することを検討している。

謝辞

本研究の成果の一部はソニーセミコンダクタソリューションズ株式会社との共同研究によるものである。

参考文献

- [1] F. Mancini, M. Dubbini, M. Gattelli, F. Stecchi, S. Fabbri, G. Gabbianelli: "Using Unmanned Aerial Vehicles (UAV) for High-Resolution Reconstruction of Topography: The Structure from Motion Approach on Coastal Environments", *Remote Sensing*, Vol. 5, No. 12, pp.6880–6898(2013)
- [2] R. Ishikawa, M. Roxas, Y. Sato, T. Oishi, T. Masuda, K. Ikeuchi: "A 3D Reconstruction with High Density and Accuracy using Laser Profiler and Camera Fusion System on a Rover", *Proc. International Conference on 3D Vision (3DV)*, pp.620–628(2016)
- [3] "Intel Realsense Technology", Available: <https://www.intel.com/content/www/us/en/architecture-and-technology/realsense-overview.html>
- [4] Z. Zhang: "Microsoft kinect sensor and its effect", *IEEE Multimedia*, Vol. 19, No. 2, pp.4–10(2012)
- [5] C. Zhang, J. Xu, N. Xi, Y. Jia, W. Li: "Development of an Omni-directional 3D Camera for Robot Navigation", *Proc. IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM)*, pp.262–267(2012)
- [6] Y. Watanabe, T. Komuro, M. Ishikawa: "955-fps Real-time Shape Measurement of a Moving/deforming Object Using High-speed Vision for Numerous-point Analysis", *Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pp.3192–3197(2007)
- [7] A. Namiki, K. Shimada, Y. Kin, I. Ishii: "Development of an Active High-speed 3-D Vision System", *Sensors*, pp.1–24(2019)
- [8] B. Curless, M. Levoy: "Better Optical Triangulation through Spacetime Analysis", *Proc. IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV)*, pp.987–994(1995).
- [9] S. Tabata, S. Noguchi, Y. Watanabe, M. Ishikawa, "High-speed 3D Sensing with Three-view Geometry Using a Segmented Pattern", *Proc. IEEE/RSJ International Conference Intelligent Robots Systems (IROS)*, pp.3900–3907(2013).
- [10] 永井良昂, 黒田洋司: "3D LiDAR を用いた物体形状に基づく空間点密度の制御", 計測自動制御学会 SI 部門講演会 *SICE-SI2019 予稿集*, pp.2093–2097(2019)
- [11] Z. Zhang: "A Flexible New Technique for Camera Calibration", *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 22, Issue 11, pp.1330–1334(2000)