

## ビジュアルサーボを搭載した水中ロボットの3次元位置・姿勢制御

### Three-dimensional Position and Posture Control of Underwater Vehicle Using Visual Servoing System

○米森健太 (岡山大) 正 矢納陽 (岡山大)  
大西祥太 (岡山大) 正 見浪護 (岡山大)  
藤本勝樹 (広和株式会社) 石山新太郎 (岡山大)

Kenta YONEMORI, Okayama University, pceo8sjx@s.okayama-u.ac.jp  
Akira YANOU, Okayama University  
Shota OHNISHI, Okayama University  
Mamoru MINAMI, Okayama University  
Katsuki FUJIMOTO, KOWA CORPORATION  
Shintaro ISHIYAMA, Okayama University

An underwater vehicle system based on visual servoing technology with binocular wide-angle lens was developed to decontaminate radiation from mud in dam lake, river, regulation pond, sea and storage reservoirs in FUKUSHIMA. A real-time pose detection of target object through binocular camera system utilizing Genetic Algorithm(GA) for underwater vehicle is used, which is combined with servo controller, enabling to enhance stability performance of the vehicle's pose relative to 3D marker. The following results were derived: (1) The robustness of the proposed regulator system has been verified by exerting abrupt disturbance. (2) A robust stability for 3D pose control in visual servoing process was confirmed. This visual servoing experiment to regulate the pose of Autonomous Underwater Vehicle(AUV) is aimed at developing an AUV system to have the vehicle recharge batteries on it to continue decontamination work under the sea without being interrupted by returning to ship and recharging.

**Key Words:** AUV, Genetic Algorithm, Visual Servoing

#### 1 緒言

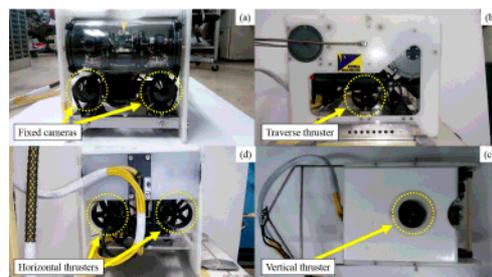
近年、海底探査等のために様々な水中ロボットが研究・開発されている。海底マッピング、水中生物の生態調査、地下資源の採掘など多様な可能性が望める。これらは水中での長時間航行が必要とされるが、水中ロボットを操縦者が長時間マニュアルで操作を行うのは多大な労力を要し、操縦者の操縦技術も重要視される。この課題を解決するため、ビジュアルサーボを用いて水中ロボットの AUV (Autonomous Underwater Vehicle) 化を行い、海底での自律航行の実現を目的として研究を進めている。

これまで、水中ロボットの自律航行に関する研究はさまざまに行われている。吉田ら [1] は水中ロボットの遠隔監視や制御に関する現状について報告しており、自律型水中ロボットは今なお発展途上の段階にあるとともに、今後の重要性について論じている。例えば、鈴木 [2]、伊藤ら [3] は水中ロボットの開発について報告しているが、これらはいずれもロボットから送られてくる画像をもとに操作者が遠隔操縦することによってロボットの運動を制御するものである。これらに対して、AUVにより水中でさまざまな作業（自動充電、生魚捕獲・観察等）を行わせる場合、対象物形状の正確な認識とともに作業環境中の外乱（流れ等）に抗するように対象物に対する正確な姿勢制御を自律的に行えなければならない。

現在、ロボットの電力供給方法には有線での供給とバッテリーの2つの方法が主流であるが、いくつかの問題点が存在する。有線の場合ケーブルが波などで消耗しやすく、また深海に潜るためにはケーブル自体がかなりの長さになり扱いに苦労する。バッテリーの場合海中での活動時間が8時間程度であり、充電のため船舶と作業場所を往復しなければならない。これらの問題を解決し水中での活動時間を延ばすために、水中に給電設備を設置しロボットが自動で充電を行うシステムの研究が行われている。我々の研究 [4] では、ロボットに搭載された2基のカメラによって対

象物を認識し、ビジュアルサーボを用いることで海底での給電を仮定した嵌合実験に成功した。

また、AUVが自動航行を行うにあたり、波をはじめとする水の流れの影響は避けることができない。そのため水中ロボットの自動制御を実現するには、波や障害物との衝突などの物理的外乱に耐えうる制御性能が不可欠である。本報告では、ビジュアルサーボを用いて認識対象物に対して定位置・姿勢制御を行う水中ロボットに、波などを仮定した物理的外乱を人為的に加えることで、ロボットの的外乱に対する復元性を検証した。さらに、海底作業中に熱水噴出孔から吹き出る泡などによって対象物の認識が阻害されるような状況を想定し、水中に泡を発生させ、このような状況下でも先ほどと同様の物理的外乱に対する復元性を検証した。提案するシステムでは両眼カメラから取得した画像とビジュアルサーボを用いることで、対象物の認識が阻害される環境下においても制御が安定し、さらには物理的外乱に対するロバスト性も実現した。



**Fig.1** Overview of ROV (a)Front view (b)Side view (c)Top view (d)Back view

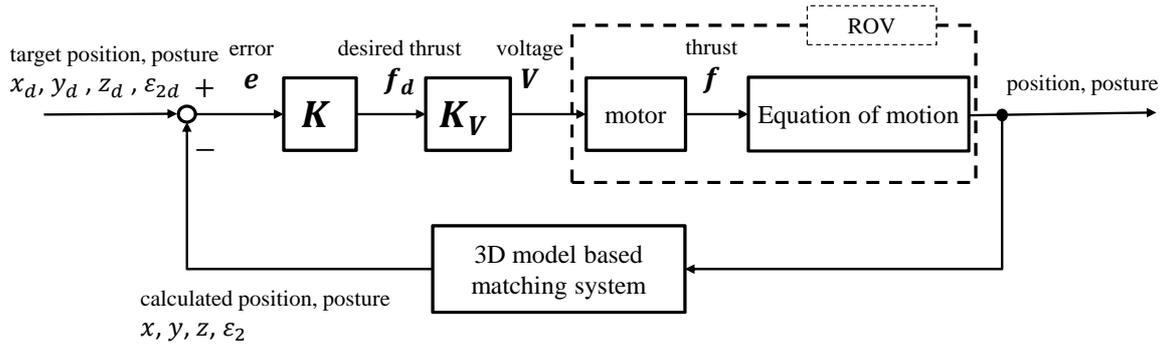


Fig.2 Control logic for the proposed system

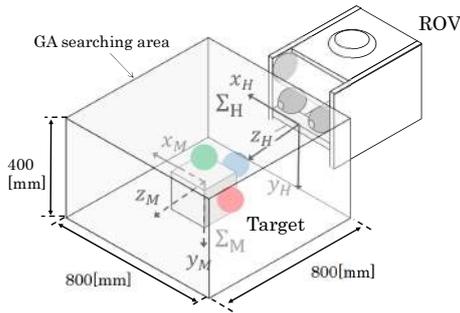


Fig.3 Underwater target and GA searching area

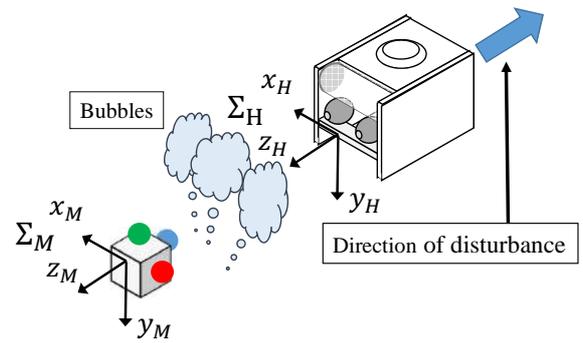


Fig.4 Coordinate system provided in underwater experiment and the direction of disturbance

## 2 ROV (Remotely Operated Vehicle)

本実験では、広和株式会社マリンシステム部製水中 TV カメラロボット ROV(Remotely Operated Vehicle) を使用する (図 1)。本ロボットは両眼視覚センサーとして、遠隔操縦用チルト機構付きカメラ 1 台 (撮像素子 CCD, 画素数 38 万画素, 信号方式 NTSC, 最低被写体照度 1.5[lx], ズーム光学 10 倍) と、制御用として前方 2 台および下方 2 台 (撮像素子 CCD, 画素数 38 万画素, 信号方式 NTSC, 最低被写体照度 0.8[lx], ズームなし) を搭載しており、MOS 制御で対象物の立体認識を行うため、前方 2 台を同時使用した。

水中動力系では、水平スラスタ 2 基 (最大推力 9.8[N]、以下同様)、垂直スラスタ 1 基 (4.9[N])、横スラスタ 1 基 (4.9[N]) を搭載している。また、照度確保のため LED ライト (5.8W) を 2 基搭載している。

## 3 3次元位置・姿勢認識

ロボット前方に搭載された 2 基の固定カメラから取得した画像情報をもとに対象物の 3 次元位置・姿勢認識を行う。提案する制御系のブロック図を図 2 に示す。提案するシステムでは、両眼カメラから取得した画像を PC に転送し、1-Step GA[1] と Model-based Matching 法 [2] を組み合わせて対象物との相対的位置・姿勢を認識している。一般的に、GA (遺伝的アルゴリズム) を用いた最適解探索では、GA が最適解を決定する際ある程度の時間を要するため、最適解が得られた時には周囲の環境が大きく変化している可能性が高い。そこで本研究では、1-Step GA を採用した。1-Step GA とは、入力された画像に対し、ビデオレート (33[ms]) で次の画像が入力されるまでの間だけ GA 遺伝子の進化を進め、その時点で最大適合度を与える遺伝子情報を最新の対象物の位置・姿勢として出力する方法で、これにより実時間での認識を可能としている。また、このとき評価に使用する適合度とは、Model-based Matching 法で定義される対象物とモデルとの一致度合いを示す適合度関数から得られる値である。これによ

り、提案システムでは対象物の 3 次元位置・姿勢の実時間認識を可能としている。また、本実験で使用する認識対象物は赤・青・緑の三原色球 (直径 40[mm]) から構成される物体である。さらに、提案システムによる対象物の位置・姿勢の認識情報は、図 3 に示す GA 探索空間内で獲得される。

## 4 ビジュアルサーボコントローラ

3 章の認識手法による認識結果から、水中ロボットに搭載した 4 基のスラスタへ指令電圧値を送ることで、水中ロボットと対象物間と以下の相対的目標位置・姿勢 ( $x_d$ [mm],  $y_d$ [mm],  $z_d$ [mm],  $\epsilon_{2d}$ [deg]) を保つようにビジュアルサーボを行う。図 6 に本研究の実験における座標系を示す。

$$\begin{aligned} x_d &= {}^H x_M = 0 \\ y_d &= {}^H y_M = -67 \\ z_d &= {}^H z_M = 600 \\ \epsilon_{2d} &= 0 \end{aligned}$$

また、 $x$ [mm],  $y$ [mm],  $z$ [mm],  $\epsilon_2$ [deg] を GA で認識した水中マーカーの位置・姿勢とおき、相対的目標位置・姿勢に水中ロボットをレギュレートさせるため、以下の P 制御から計算される指令電圧値を各スラスタへ与える。

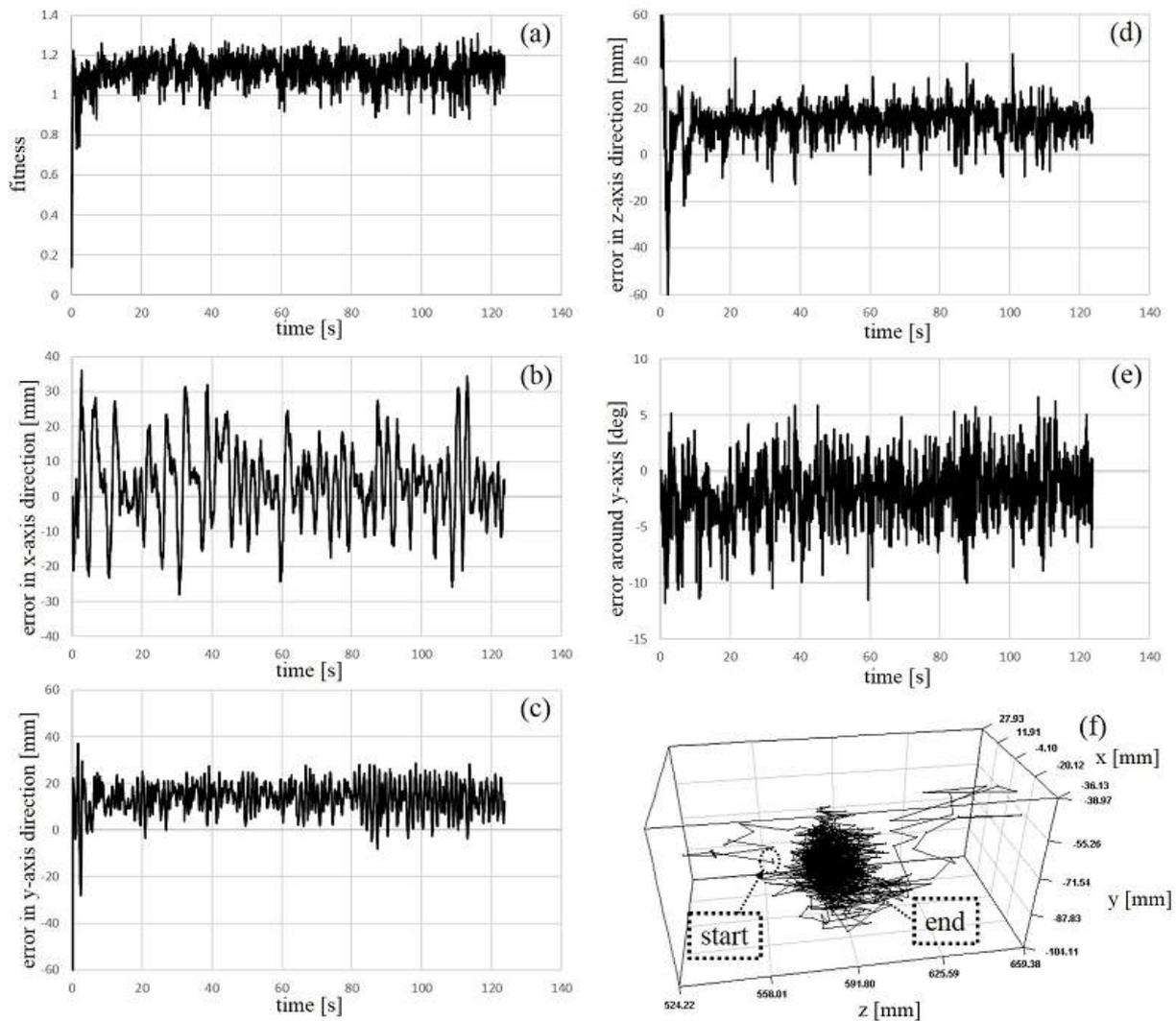
$$\text{奥行き方向} : v_1 = k_{p1}(z_d - z) + 2.5 \quad (1)$$

$$\text{鉛直軸回転} : v_2 = k_{p2}(\epsilon_{2d} - \epsilon_2) + 2.5 \quad (2)$$

$$\text{鉛直方向} : v_3 = k_{p3}(y_d - y) + 2.5 \quad (3)$$

$$\text{右水平方向} : x_d - x < -5 \text{ (オン/オフ制御の条件式)}$$

$$\text{左水平方向} : 5 < x_d - x \text{ (オン/オフ制御の条件式)}$$

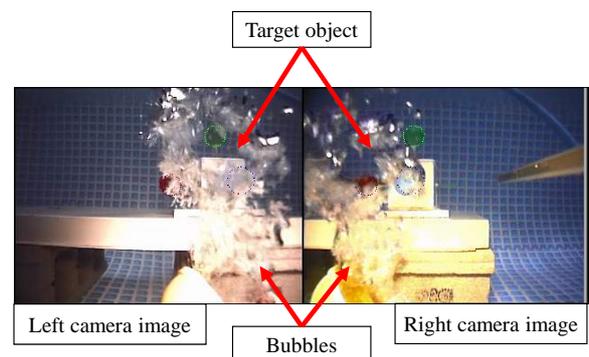


**Fig.5** Control result without additional disturbance: (a)fitness value, (b)error in x-axis direction, (c)error in y-axis direction, (d)error in z-axis direction, (e)error around y-axis, (f)3D trajectory of underwater vehicle

ただし、x軸方向はON/OFF制御を採用しており、上ではその条件式を記述している。またx軸およびz軸まわりの姿勢に関しては、ロボットの移動によらず微小であるため、制御の対象として扱わない。

## 5 水中制御安定性実験

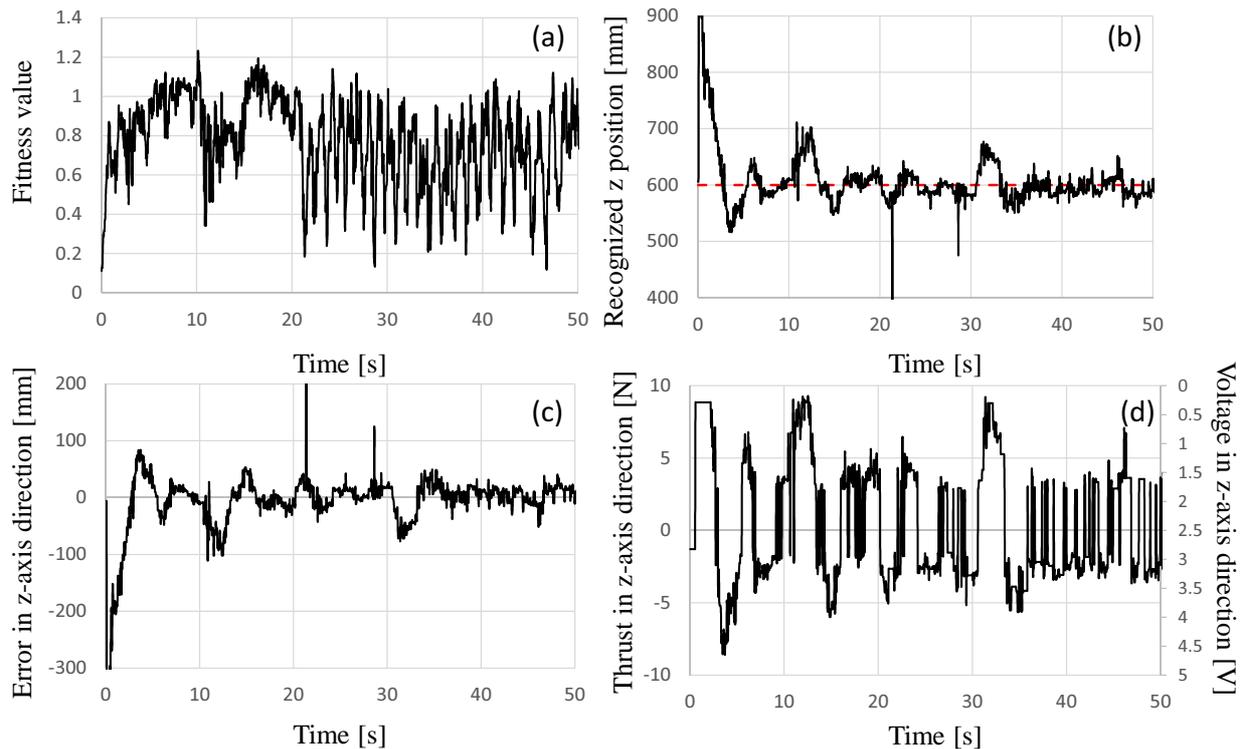
任意位置に水中固定設置した対象物に対し、水中ロボットに目標位置・姿勢 ( $x_d = 0[\text{mm}]$ ,  $y_d = -67[\text{mm}]$ ,  $z_d = 600[\text{mm}]$ ,  $\epsilon_{2d} = 0[\text{deg}]$ ) を与え、ビジュアルサーボを行った結果を図5に示す。このときロボットに人為的な外乱は与えておらず、水中の泡も発生させていない。GAの認識誤差、ロボット移動時に生じるテザーケーブルからの反力、さらに移動時に発生する水圧変化による実験槽側面からの反射波を受け、相対的目標位置・姿勢からの誤差が定常的に現れるものの、対象物に対する相対的位置・姿勢を維持するMOS制御方式では4基のスラスタを常時同時稼働させることでこれら外乱要素をキャンセルし、相対的目標位置・姿勢近傍に水中ロボットの位置・姿勢を維持できることが確認できる。また、各目標値に対する定常誤差は、P制御によって与えられる推力と釣り合っている状態を意味している。



**Fig.6** Left and right camera images with bubbles

## 6 ロバスト性検証実験

水中制御安定性実験と同一の目標位置・姿勢 ( $x_d = 0[\text{mm}]$ ,  $y_d = -67[\text{mm}]$ ,  $z_d = 600[\text{mm}]$ ,  $\epsilon_{2d} = 0[\text{deg}]$ ) をロボットに与え、ビジュアルサーボを行った。また、海底探索中に熱水噴出孔



**Fig.7** Control result with disturbance in z-axis direction: (a)fitness value, (b)recognized z-position, (c)error in z-axis direction and (d)thrust in z-axis direction

から吹き出る泡などによって対象物の認識が阻害されるような状況を想定し、ロボットと対象物との間に泡を発生させた。さらに波や障害物との衝突を仮定した物理的外乱を人為的に加えることで、外乱に対する復元性の検証を行った。

実験結果を図7に示す。(a)はGA認識の適合度、(b)は水中ロボットが認識した対象物のz軸方向の位置、(c)は相対的目標位置・姿勢と水中ロボットが認識した対象物の位置・姿勢とのz軸方向の誤差、(d)はスラスタに与えた推力(z軸方向)を表している。実験開始から10[s]で対象物からロボットを遠ざける方向(図6)に外乱を加えた。外乱が加えられた際、一時的に適合度が低くなるが、ビジュアルサーボを維持しつつ相対的目標位置・姿勢からの誤差に応じてスラスタに与えられる推力が変化することがわかる。続いて実験開始から20[s]で水中に泡を発生させた。泡のない環境での結果と比較してわかるように、適合度の大きなばらつきが見られる。しかし、このような状態であってもロボットは目標位置付近に滞在しており制御が行えていることがわかる。さらに泡が発生した環境の下、実験開始30[s]で先ほどと同様に人為的に外乱を加えた。その際も、泡がない状況と同様に目標位置・姿勢からの誤差を打ち消すようにロボットに推力が発生し、目標位置・姿勢にロボットが復元できていることが確認できる。

以上より、提案システムでは外乱に対して数秒程度でロボットが目標位置に復元でき、さらには水中で泡が視界を遮るような環境下でも、外乱に対するロバスト性を有することが確認できた。

## 7 結言

海底探索や水中生物の生態調査等を目的として、水中ロボットのAUV化を目指した研究開発を進めている。そのため本研究では、両眼カメラによるビジュアルサーボを搭載した水中ロボットの制御性能検証を行い、以下の結論を得た。水中に固定設置された対象物に対して提案手法を用いて認識を行い、提案するシステムでは、波や障害物との衝突を想定した物理的外乱に対してロバ

スト性を有することを確認した。また、熱水噴出孔から吹き出る泡などによって対象物の認識が阻害されるような状況下でも、ビジュアルサーボが途切れることなく制御が実現した。

## References

- [1] 吉田弘, 百留忠洋, 石橋正二郎, 越智寛, 志村拓也, 水中ロボットにおけるテレロボティクス, 日本ロボット学会誌, Vol.30, No.6, 578-581 2012.
- [2] 鈴木正憲, 原子力発電プラント水中検査用ROVの開発, 日本ロボット学会誌, Vol.22, No.6, 697-701 2004.
- [3] 伊藤智之, 木村元比古, 小型水中点検ロボットの開発, 日本ロボット学会誌, Vol.22, No.6, 702-705 2004.
- [4] 大西祥太, 須浪唯介, 西村健太, 見浪陽, 石山新太郎, 見浪護(岡山大), 藤本勝樹(広和(株))”MOS制御知能を搭載した遠隔操作型水中ロボット(ROV)の自律制御化(AUV)技術”, 第57回自動制御連合講演会, 1B08-2, 2014.
- [5] W. Song, M. Minami, S. Aoyagi, “On-line Stable Evolutionary Recognition Based on Unit Quaternion Representation by Motion-Feedforward Compensation”, International Journal of Intelligent Computing in Medical Sciences and Image Processing (IC-MED) Vol. 2, No. 2, pp 127-139, 2007.
- [6] 西村健太, 候森, 前田耕市, 見浪護, 矢納陽, ビジュアルサーボ中の実時間ポーズトラッキング性能の解析, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2013, 2013.