

セミナーのサマリーを紹介いたします。

連番	セミナー題名 講師名 および サマリー
1	<b>半導体と MEMS の加工技術： 土屋智由</b>
	1. 半導体微細加工技術の基本 ウエハ、成膜、リソグラフィ、エッチング 1. MEMS 用加工技術 マイクロマシニング、深掘ドライエッチング、犠牲層エッチング 3. 集積化技術 4. パッケージング技術
2	<b>MEMS 設計のための材料と力学： 池橋民雄</b>
	Micro Electro Mechanical Systems (MEMS) はその名の通り electronics (電気) と mechanics (機械) が融合したシステムであり、そのデバイス設計には両分野の知識が必要となります。このセミナーではこのうちの機械の部分について紹介します。まず応力・歪・ヤング率といった材料力学の基本を確認した後、実際の MEMS デバイスで使用される材料 (延性材料・脆性材料) について説明します。また MEMS デバイスの特徴をスケーリングの観点から考察します。次に MEMS デバイスの駆動に用いられる静電アクチュエータの動作を力学の基本に立ち返って解説します。その上で、種々の静電アクチュエータ、プルイン・プリアウト現象、静電アクチュエータを用いた共振周波数の調整といったトピックスを紹介していきます。
3	<b>加速度センサ 土屋智由</b>
	1. 加速度センサの力学 1. バネ・マス・ダンパ系, 2. 感度と周波数帯域, 3. ノイズ、バイアス… 2. 静電容量型加速度センサ 1. 原理と基本構造, 2. 性能の限界は? 3. 多軸加速度センサ 1. 構造, 2. 特性評価
4	<b>MEMS センサのための回路と制御： 池橋民雄</b>
	このセミナーでは MEMS センサの設計・制御・評価で必要となる基本的な事項について解説しつつ、MEMS センサの性能を向上させるための様々なアプローチを紹介していきます。最初に分解能、感度、ダイナミックレンジ等の用語の定義を確認したあと、ノイズ (白色ノイズ、 $1/f$ ノイズ、アラン分散) について説明します。次にセンサシステムを理解するための基本的事項 (サンプリング定理、センサ伝達関数、入力換算ノイズ) について具体例を交えつつ紹介します。またセンサシステムの性能を向上させるための回路・制御技術について解説します。具体的には平均化処理による白色ノイズの低減、 $1/f$ ノイズを低減する同期検波回路、ダイナミックレンジを拡大するフォースバランス手法、といったトピックスを紹介します。
5	<b>角速度センサ, ジャイロ： 土屋智由</b>
	1. 角速度センサの力学 1. 2 自由度バネ・マス・ダンパ系 2. 動作原理、感度 3. ノイズ、バイアス… 2. 「音叉型」振動ジャイロスコープ 1. 原理と基本構造 2. 漏れ振動、バイアス、温度特性 3. 高性能化に向けて 1. 構造 (軸対称型、4 マス、ワイングラス) 2. 動作モード (角速度検出、全角度検出…)
6	<b>振動を用いた慣性センサの評価・校正 ー俗論編ー： 梅田 章</b>
	「俗論」なる言葉には、維新の志士達の命を懸けた議論の中に出てきそうな雰囲気がありますが、振動を用いて慣性センサを評価・校正する技術の重要性を鑑みると、大げさでは決してありません。俗論編では世の中で広く知られている国際規格が、高等学校で教えられる初頭物理の教えを満たしていないこと、かつ、その他の国際規格の内容にも整合性を持たないことを説明します。学生さん、若いエンジニアさんは国際規格は正しく決められていると思うかもしれませんが、そうとは限りません。本分野は典型例でしょう。複雑な背景と諸事情によってこうなったわけで、問題はここからどうするかであります。計測標準が国際的にはどのように決められているかをお話しし、その長所、欠点についてもお話いたします。ISO/IEC では、計測標

	<p>準はどのように決める取り決めになっているか。俗論編は、第六回の途中で切り上げ、正論編に入る予定です。</p>
7	<p>振動を用いた慣性センサの評価・校正 —正論編— : 梅田 章</p> <p>正論編で取り上げる技術は、ISOにもなくIEEE規格にもない日本で発明された技術です。発明者は講演する梅田です。産総研在職当時の発明であり、職務発明として登録され、産総研のベンチャーが設立されましたので、ベンチャーが実施権を共有しています。</p> <p>基本は、加速度、角速度がベクトル量ですから、加速度計、ジャイロ스코プへの入力量はベクトル量であり、加速度計/加速度センサ/ジャイロ스코プの出力量の単位は電圧に変化しても、ベクトル量であることは変わりはありませんね。ですから、加速度計/ジャイロスコプによる変換に線形性が成り立つと仮定すれば、感度は行列になります。数式でもこれは導けますが、では非線形はどう扱うかについて、多軸慣性センサの場合にはどうなるか、この考え方を実現するための振動台はどんなものか、実際に6軸のIMUの感度を求めた例、実際の感度では、常に感度マトリックスの成分を周波数の関数として考えるか、感度マトリックスはどのような形態をとるか、感度マトリックスのその他の利用方法、等についてお話しします。</p>
8	<p>衝撃を用いた慣性センサの評価・校正 —俗論編— : 梅田 章</p> <p>衝撃の計測標準が供給されているか否かについては、はっきりしません。最近のMEMSジャイロの研究によれば、15万gを受けても壊れないそうである。明らかに軍用で、産業用であれば自動車衝突時の人員保護や頭部保護などが一般的ではなからうか。それでも、計測標準の一般的構築法の原則論に従って構築する方法が、規格化されているかと問われれば、そうは言い難いのが実情である。そこで、衝撃加速度をどのように発生させ、対象に印加する方法の実情として、どのようになっているかを、俗論編ではお話ししたい。それらに共通する問題点は何なのかをお話しし、計測標準確立の原則論から考えたときに、どうでなければならぬかを述べよう。これまでが、準備段階であり、大部分が俗論である。ここでは、ISO規格の一部もなぜ俗論なのかを説明する。</p>
9	<p>衝撃を用いた慣性センサの評価・校正 —正論編— : 梅田 章</p> <p>正論編では、衝撃加速度の発生で何が問題になるのか、から話を始めよう。つまり剛体運動としての衝撃を発生させるのか、波動が構造内部に発生しても無視して衝撃を発生させるのか、が大きな分かれ目である。同時に問題になるのが衝撃の波形である。さらに、校正法であるから、一次校正、二次校正、三次校正と言うように段階的な構造をもっていなければならない。これらの条件を満足する方法として、金属丸棒中を伝播する弾性波パルスの端面での反射によって発生する加速度パルスを利用する方法が考案された。副次的な成果としては、歪ゲージの周波数応答特性が明らかになり、パレルモ大学(伊、シチリア島)との共同研究に発展した。産総研は成果を国際規格することを推奨していたので、ISO/TC108/SC3へ提出して規格にしようとしたが、拒絶され後の火種の原因となった経緯についてもお話しする。国際規格を作成することは、国際で自分の意思を通すことであるから、戦いである。日本では軋轢が生じること自体を悪者視するけれども、国際の場では軋轢があつて当たり前であるから、それに挫けてはならない。政治的な軋轢の中で、自分の思いを遂げることは、国内ではそうザラにあることではない。貴重な経験ができるのである。この辺は、国際的計測標準体制の利点でもあるけれども、欠点にもつながるのである。この辺は、資料にはできないけれども、経験談としてお話しして、若い人達の勇気を奮い起こしたい。</p>
10	<p>不確かさとは何か、—歴史的経緯と問題点— : 梅田 章</p> <p>計測における不確かさの表現ガイド、Guide to the Expression on the Uncertainty in Measurementの第一版は1992年に発行された。通常GUM ISOと呼ばれる。この規格を作成したのは、NISTのTaylor博士である。考え方の出発点であるので、第一般を説明したい。その後に改訂版が発行された。改訂版は、Bayesian統計学に基づいている。これに対して、1992年発行のGUM-ISOは、Frequentist統計学に基づいている、と言われている。2000年前後から、GUM-ISOに対して批判的な論文が多数現れたので、その概要を説明したい。また、Bayesian統計学とFrequentist統計学の概要についても触れたい。パリに本部が置かれているメートル条約の傘下に、計測の不確かさについて議論する専門の委員会が置かれている。そこでの扱いがどのようになっているかについて述べる。この深刻な国際的議論へ、日本からどのような貢献がなされているかについても最後に述べておこう。</p>
11	<p>ジャイロ스코プ —ジャイロ入門— : 中村 茂</p> <p>【11回~14回を通しての序論】</p> <p>角速度を計測するジャイロの歴史は1744年のSerson(英)による回転円板実験、1758年のEulerによる数学的基礎の確立から始まり、フーコー(Foucault(仏))が約100年後の1851年に「振り子」を用いて地球自転を検証した。フーコーは翌1852年には回転円板により地球自転</p>

	<p>を検証し、その装置を「ジャイロスコープ：回転（ジャイロ）・見る（スコープ）」と命名した。</p> <p>ジャイロスコープはそれ以来急速な進歩を遂げ、その角速度検出性能は地球自転角速度の百万分の一の角速度をも検出可能になった。</p> <p>一方、急速な進歩と拡大を見せる MEMS 技術は、ジャイロの小型化と大量生産によるコスト削減に大きく貢献し、特殊なセンサと認識されがちであった「ジャイロ」の一般化を加速している。</p> <p>本セミナーではフーコーの実験から 170 年以上の歴史を持つ「ジャイロ」について、その技術の歴史から、試験方法の実際、及びジャイロを用いたシステムの実際までを 3 回に分けて平易に紹介する。一方、ジャイロを用いたシステムにとって不可欠なセンサである「加速度計」は、検出性能はダイナミックレンジで 8 桁、最小検出加速度は「地球潮汐」をも検出可能なレベルに到達しており、その動向、性能評価の方法についても紹介する。</p> <p>尚、本講座の理解には高校生程度の物理学の基礎知識を必要とします。</p> <p>第 1 回：ジャイロ入門 ジャイロの歴史、ジャイロの各種方式について解説し、ジャイロ技術の現状及び今後の動向、特に高精度化の動向を紹介する。 キーワード：レートジャイロ、RLG、FOG、CVG、HRG、MEMS ジャイロ</p>
1 2	<p><b>ジャイロスコープ – ジャイロの性能評価 –</b> : 中村 茂</p> <p>ジャイロの性能評価について一般的な項目の試験方法について紹介するとともに、各種方式のジャイロ特有の誤差と試験・評価についても紹介する。 キーワード：レートテーブル、アラン分散</p>
1 3	<p><b>ジャイロスコープ – 高精度加速度計入門 –</b> : 中村 茂</p> <p>高精度加速度計について、各種の方式を解説し、高性能化の動向について紹介する。 キーワード：サーボ型、重力加速度</p>
1 4	<p><b>ジャイロスコープ – 慣性センサシステムの実例 –</b> : 中村 茂</p> <p>慣性航法装置をはじめ、ジャイロを用いた各種システムの原理を解説し、実際のシステム例を紹介する。 キーワード：ジャイロコンパス、IMU、慣性航法装置、スタビライザー</p>
1 5	<p><b>海中ロボットシステムのシステムデザインとナビゲーション設計(1)</b> : 吉田 弘</p> <p>海中ロボットの基本的なナビゲーション方法について解説し、現在の問題点について説明する。キーワード：慣性航法装置、ドプラー速度計、音響測位装置。</p>
1 6	<p><b>海中ロボットシステムのシステムデザインとナビゲーション設計(2)</b> : 吉田 弘</p> <p>極限環境海中ロボットと海洋ビジネス向けの海中ロボットについて、システムデザインの手法をもちいてナビゲーションシステムを設計し、その違いについて解説する。 キーワード：深海・極域・浅海</p>

#### 講師略歴

講 師	
土屋智由	所属：京都大学 大学院工学研究科 マイクロエンジニアリング専攻 教授
池橋民雄	1995 年に株式会社東芝入社し半導体メモリの回路設計業務に携わった後、2004 年から MEMS デバイスの研究開発に従事する。これまでに RF-MEMS、圧力センサ、水素センサ、加速度センサ、ジャイロ等の MEMS デバイス開発に携わる。2019 年 4 月に早稲田大学 大学院情報生産システム研究科に嘱任。
梅田 章	1973 年計量研究所入所、2008 年産総研退官、現在慣性センサ応用技術研究協会理事長 超音波探傷法、慣性センサの評価校正法、マイクロマシン評価技術等の研究に従事 その中で、マトリックス感度を考案・特許化、三軸六自由度振動台を製作した。衝撃加速度により加速度計の周波数特性計測装置が、マイクロ構造の振動特性計測に有用なことを示した。
中村 茂	1971 年(株)東京計器入社、2010 年東京計器定年退職オプトクエスト入社、2015 年オプトクエスト退職、その間潜水艦用慣性航法装置の開発に従事（1 自由度ジャイロ、カルマンフィルタの開発を担当）、慣性航法装置用リンレーザージャイロ、偵察ヘリ用及び船舶用光ファイバジャイロ、浮上回転型 MEMS 慣性センサ等の開発に従事
吉田 弘	国立研究開発法人海洋研究開発機構技術開発部 次長（兼）地球環境部門北極環境変動総合研究センター北極観測技術開発グループ グループリーダー