

### 目次

- ・ 2024年度関東支部総会・講演会・懇親会報告……村上弘記、児玉祐一 (pp.2-3)
- ・ series ものづくり出前講義 (4) 「エネルギーのはなし」・「少年少女発明クラブ」・「寺子屋」……藤川卓爾 (pp.4-8)
- ・ series 研究最前線 (14) モーショントラッキングによる工作機械の運動計測……河野大輔 (pp.9-15)

大河ドラマ「光る君へ」で話題になっている石山寺(滋賀県大津市)に行ってきました。

紫式部が「源氏物語」の着想を得たとされるお寺です。



## 2024 年度関東支部総会・講演会・懇親会報告

2024年度 関東支部長 村上弘記 (S60/1985卒)  
2023年度 関東支部事務局長 児玉祐一 (H8/1996卒)

2024年4月6日(土)に関東支部総会を開催いたしました。会場は、東京駅前の日本工業倶楽部です。歴史を感じさせる重厚な外観と、ディテールまでこだわった華やかな内装です。今年度は、コロナ明けの久しぶりのリアルな再会を企図し、リアル開催のみで開催いたしました。



総会の様子

総会は、正井健太郎支部長(S57/1982卒)の挨拶の後、2023年度の活動報告、会計報告、会計監査の報告を行い、2024年度の新役員案、予算計画、活動計画を提案し、出席者により承認いただきました。最後は村上弘記新支部長(S60/1985卒)の挨拶で締めくくりました。

### <24年度関東支部役員>

支部長 村上弘記(前出)  
副支部長 能勢幸嗣(H3/1991卒)、蓮尾昌裕(H61/1986卒)、  
児玉祐一(H8/1996卒)  
監事 山下真司(H63/1988卒)  
顧問 熊澤正博(S43/1968卒)、正井健太郎(前出)  
事務局長 古賀 響(H7/1995卒)  
事務局次長 尾形秀樹(H6/1994卒)

続いて蓮尾副支部長(機械理工学専攻教授)より、大学の近況を紹介いたしました。

講演会では、DMG 森精機社長 森 雅彦様(H60/1985卒)より「MX(マシニング・トランスフォーメーション)～DMG



講演会(森様)

森精機のグローバル成長の裏舞台～」と題した講演をいただきました。同社のグローバル成長を支える企業戦略に関する講演で、活発な質疑もあり、出席された方には大好評でした。また KART（学生フォーミュラ）の報告では、プロジェクトの進め方などで活発な質疑と激励がございました。

続く懇親会は、丸の内 BASE で行いました。総会会場の雰囲気から一転して、レトロなアメリカンダイナーでカジュアルな雰囲気です。正井前支部長の乾杯で開会し、千々木亨京機会会長（S54/1979 卒）からはご挨拶とともに、石川県の銘酒 3 本を差し入れていただきました。45 名の出席者は、銘酒やクラフトビールを片手に立食で歓談を楽しみ、締め挨拶は村上新支部長が行いました。最後は数年ぶりに「琵琶湖周航の歌」を合唱し、更なる京機会の発展を確かめました。



琵琶湖周航の歌 合唱



集合写真

## series ものづくり出前講義 (4)

## 「エネルギーのはなし」・「少年少女発明クラブ」・「寺子屋」

藤川卓爾 (S42/1967 卒)

「エネルギーのはなし」と題して最初に講演したのは長崎総合科学大学のオープンキャンパスでした。その後、諫早高校のSSHや他の高校の進学相談会模擬講義でも話しました。また、長崎大学工学部の非常勤講師として「エンジニアリング・マネジメント」という科目を担当しましたが、その中の1コマとしてもこのテーマを選びました。

講演の内容をまとめて火力原子力発電技術協会の機関誌「火力原子力発電」に寄稿しました。これは後に「京機短信」No.110～128の間に分割して転載していただきました。

既報のとおり、平成26(2014)年からは京機会九州支部の「出前授業」で講演していますが、この他にもこのテーマで話しました。

平成29(2017)年に兵庫県淡路市立江井小学校が143年の歴史を閉じました。筆者の曾祖父はこの小学校創立時のたった一人の校長兼教員兼用務員でしたので、校長に「初代校長の曾孫が最後の卒業生に授業をする」ことを提案して「エネルギーのはなし」の講演と「ミニ風車」づくりをしました。この小学校は閉校後、隣町の一宮小学校に統合されましたが、ここでも「エネルギーのはなし」の講演をしました。また、筆者が参加している「淡路少年少女発明クラブ」でも講演しました。小学生が対象なので、これらの講演では各種発電方式の実演も実施し、水力発電では受講者に手伝って貰いました。

「少年少女発明クラブ」は、発明協会創立70周年の記念事業の一環として、昭和49(1974)年にスタートした事業です。現在、全国47都道府県に約200か所、約10,000名の子どもたちと約2,900名の指導員が活動しています。創立当時の発明協会会長でソニー創業者の故井深大氏は、日本が将来にわたり科学技術創造立国として持続的な発展を実現するには、「ものづくり」に携わる人材の育成が不可欠であり、次代を担う青少年に、「ものづくり」に親しむ環境を整えることが重要であると提唱しました。

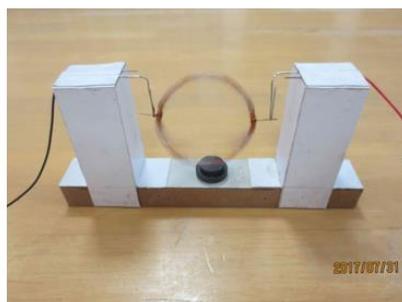


「淡路少年少女発明クラブ」での「エネルギーのはなし」実演付き講演

「淡路少年少女発明クラブ」はそれから 16 年後の平成 2 (1990) 年に創立されました。全国のクラブの中でも比較的古い方ではないかと思えます。ここでは小学校 3~6 年生の子どもたちに「ものづくり」体験として工作を教える他に、発明協会が主催する発明工夫展・未来の科学の夢絵画展への出品の手助けをしています。筆者は参加した年に「ミニ風車」、「コイルモーター」、「アクロバット人形」の製作指導をしました。翌年は市販のキットを使用した「パタパタ飛行機」と「ライト兄弟の複葉機」を作りました。3年目は「縄跳び人形」、「メビウスの輪とミウラ折り」、4年目は「観覧車」と「正多面体」を作りました。



「ミニ風車」



「コイルモーター」



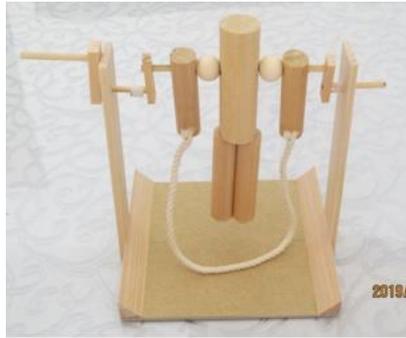
「アクロバット人形」



「パタパタ飛行機」



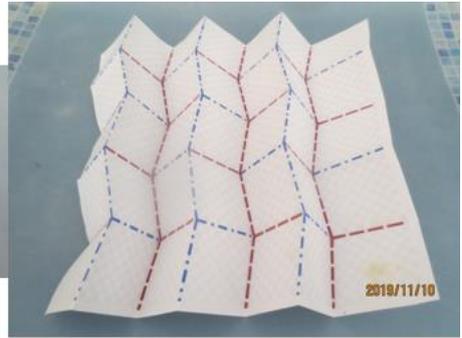
「ライト兄弟の複葉機」



「縄跳び人形」



「メビウスの輪」



「ミウラ折り」



「観覧車」



「正多面体」

これらの中で、苦勞したのは「アクロバット人形」と「観覧車」でした。「アクロバット人形」は市販のキットをまねて、30人分の材料を自作しました。人形の胴体、腕、脚を薄板から糸鋸盤で切り出すのが大変でした。「観覧車」は部材数が多くゴンドラが8台あり、これを全部作っていたら時間が足りないので予めフレームとゴンドラ6台を指導員が作りました。



「アクロバット人形」の材料準備



「観覧車」の材料

「観覧車」は普通に作ると左右のフレームの Gondola 支持軸の穴が合わず Gondola が傾いてフレームに接触して上手く回りません。Gondola を少し小さくし、片側のフレームを基準にしてもう一方のフレームを組み立てることにより解決しました。



製作精度不良による Gondola の傾き

筆者はこの2年間、川崎市立今井小学校で NPO 法人「キーパーソン 21」が運営する「寺子屋今井学習室」に先生の一人として参加しました。「寺子屋」では毎週水曜日の放課後に子どもたちが来て1時間を過ごします。子供たちは先ず宿題をします。算数の計算と国語の漢字書き取りです。なかなか熱心にやっています。その後、子どもたちの母親世代の女性の先生たちが準備した折紙や手芸やゲームなどをして遊びます。

「キーパーソン 21」は平成 12（2000）年に設立され、小中高生を中心としたキャリア教育を事業としています。代表の朝山あつこ氏は次のように言っています。

「今の日本の子供たちに必要なことは夢をもつこと、どのように生きたいか、どんな人間になりたいか、どんな仕事がしたいのかをはっきりさせることである。そのためには、もっと仕事について知る必要があるが、今の日本の教育の中では、受験勉強に多大なエネルギーを注ぐ状況が続き、大半の子供は何のために勉強するのか？ 何のために学校に通っているのか？ 将来自分は何をしたいのか？ どんな職業があるのか？ が分からず、自分の将来の職業や仕事について考える機会もなく進路を決めている。誰でも一生のうちで、あの人みたいになりたい、あの

一言が頭に焼き付いてこの道に入った、あの行動が心に残ってここまでがんばった、と言えるような人物の存在がある。その人をキーパーソンと呼ぶ。『キーパーソン21』という言葉には『21世紀を担う子供たちの心の扉のかぎを握る人』という意味も込められている。」

「少年少女発明クラブ」はものづくり工作が目的の会なので全員が与えられた工作に取り組みますが、「寺子屋」は学童保育のようなものです。工作も自分が面白いと思わない限りやろうとしないので、何を準備するか知恵を絞りました。

「ミニ風車」、「コイルモーター」、「正多面体」の他に「ハウス」、「オランダ風車」、「黒船」などを準備したところ、何人かの子供たちは興味を持ちました。「プーリー2段減速機」や「リニアモーターカー」のように、準備した完成品を動かすのは楽しかったようです。



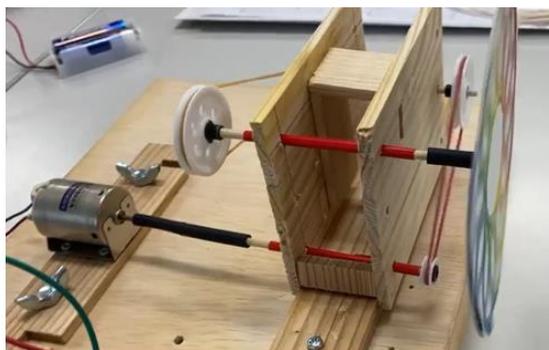
「ハウス」



「オランダ風車」



「コイルモーター」



「プーリー2段減速機」



「黒船」

筆者がキーパーソンになることができたかどうかは分かりませんが、些かなりともお役に立てたのではないかと思います。

## series 研究最前線 (14)

## モーショントラッキングによる工作機械の運動計測

河野大輔 (H17 /2005 卒)



## 「1/1000ピクセルのサブピクセル分解能は可能なのか？」

## 1. はじめに

私は工作機械の運動軌跡を測定して、運動誤差の評価や補正を行う方法を研究しています。このために、この数年、画像を用いた運動計測に取り組んでいます。本方法では、測定対象が動く際の動画を撮影し、画像処理によって各画像における測定対象を検出して位置を求めます。モーショントラッキング、モーションキャプチャなどの名前と呼ばれる方法です。広い範囲での3次元計測が可能、運動軌跡の自由が高い、工具—工作物間の3次元的な相対位置を直接測定できる可能性がある、などの利点に魅力を感じています。

モーショントラッキングはコンピュータビジョンの分野では一般的な方法ですが、工作機械の運動計測での応用が増えているのはこの10年間程度と比較的新しい分野です。工作機械では $10^{-6}$ 以上のダイナミックレンジ（分解能 / 測定範囲）が必要とされます。例えば1 mの測定範囲なら、最低でも $1\mu\text{m}$ の変位を検出する必要があります。しかし、モーショントラッキングのダイナミックレンジはおおよそ $10^{-5}\sim 10^{-4}$ と1桁～2桁の分解能向上が必要です。そこで、モーショントラッキングの高分解能・高精度化を目指して、計測セットアップのハードウェア構成と画像処理の両面から研究を行っています。ここでは、これまでの研究開発の経過を紹介します。

## 2. モーショントラッキング

まず、画像計測における分解能とモーショントラッキングの方法について述べます。図1に示すように、画像計測では、カメラを用いて測定対象の画像を撮影します。測定対象の画像は光学系によって縮小されてイメージセンサ上に結像します。この画像において対象のエッジなどの特徴点を検出し、画像内での2次元位置

を求めます。画像の縮小率を予め求めておけば、画像座標から物理座標に換算が可能です。特徴点検出の不確かさを低減するために、目印となるターゲットマーカ（以下マーカ）を設置する場合があります。

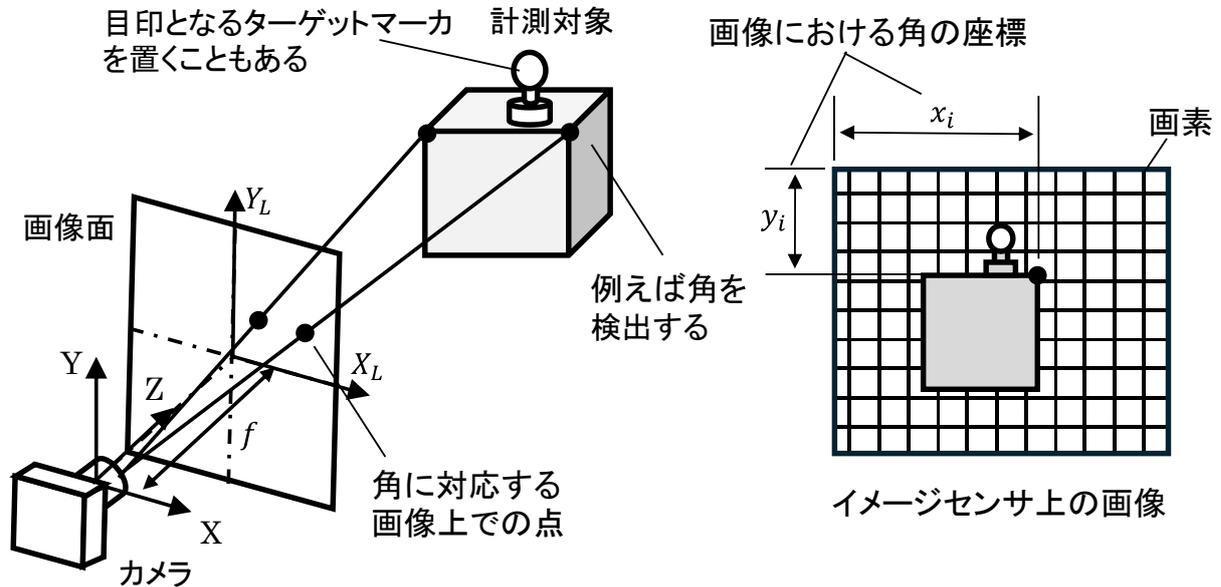
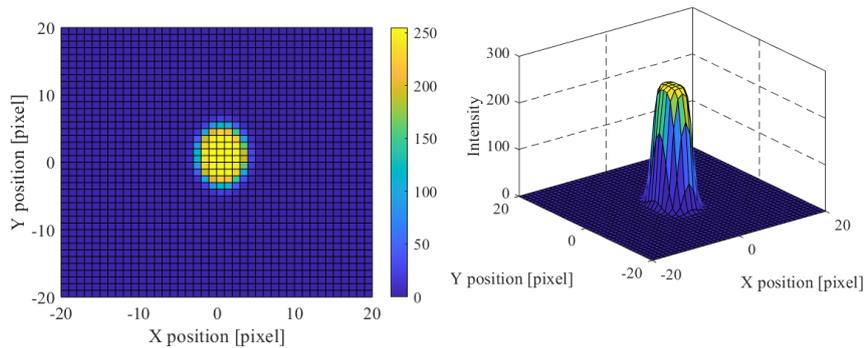


Fig. 1 画像による位置測定。

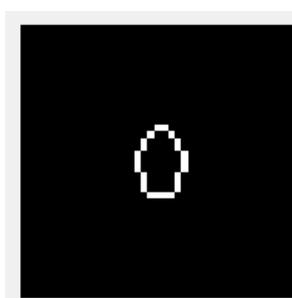
画像内での2次元位置の算出は、最も単純にはピクセル単位で行います。すると、測定における分解能 = 測定範囲 / イメージセンサの画素数となります。一般的なカメラで、数1000ピクセル×数1000ピクセル程度の画素数が最大なので、ダイナミックレンジは $10^{-4} \sim 10^{-3}$ となります。工作機械では、これでは分解能が足りません。そこで、画像処理によってピクセル以下の単位で位置を求める必要が出てきます。何分の1ピクセルの分解能が得られるかをサブピクセル分解能と呼びます。

サブピクセル分解能を得る基本原理は平均化および内挿です。図2では、画像処理法の中のエッジ検出と関数フィッティングの例を示します。例えば図2(a)に示す球光源の中心を求めることを考えます。エッジ検出では、図2(b)に示すように、球（画像上では円）のエッジを検出し、エッジの画素位置の平均をとることでサブピクセル分解能が得られます。関数フィッティングでは、上に凸な関数を輝度分布にフィットし、関数の中心から輝度分布の中心を求めます。輝度分布はピクセル単位での離散データですが、関数をフィットすることで、内挿によって中心を求められます。エッジ検出のサブピクセル分解能は1/10ピクセルレベルです。私はシグモイド関数をフィットする方法を用いており、後述する高輝度ターゲット

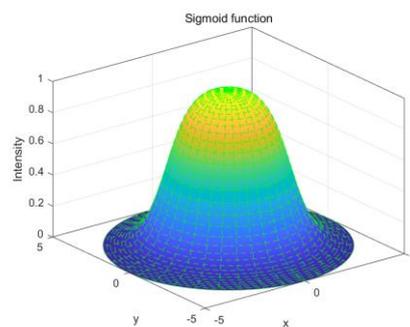
トマーカとの組み合わせで1/100ピクセルレベルのサブピクセル分解能が得られています。



(a) ターゲットの輝度分布



(b) エッジ検出で  
検出されたエッジ



(c) シグモイド関数

Fig. 2 特徴点検出の方法。

### 3. ターゲットマーカの開発

私が開発しているシステムでは、発光するターゲットマーカを使っています。分解能と精度の向上のためには、マーカの輝度分布の安定性とS/N比が重要です。私はハードウェアの開発が好きなので、図3に示すように、これまで少しずつマーカを改良してきました。最初は点光源の開発を目指したのですが、電球では上手くいきませんでした。点光源に近づけるように作製されたプラネタリウム用の電球なども試してみたのですが、完全な点光源は難しいと判断して、球光源を作る方針に変えました。

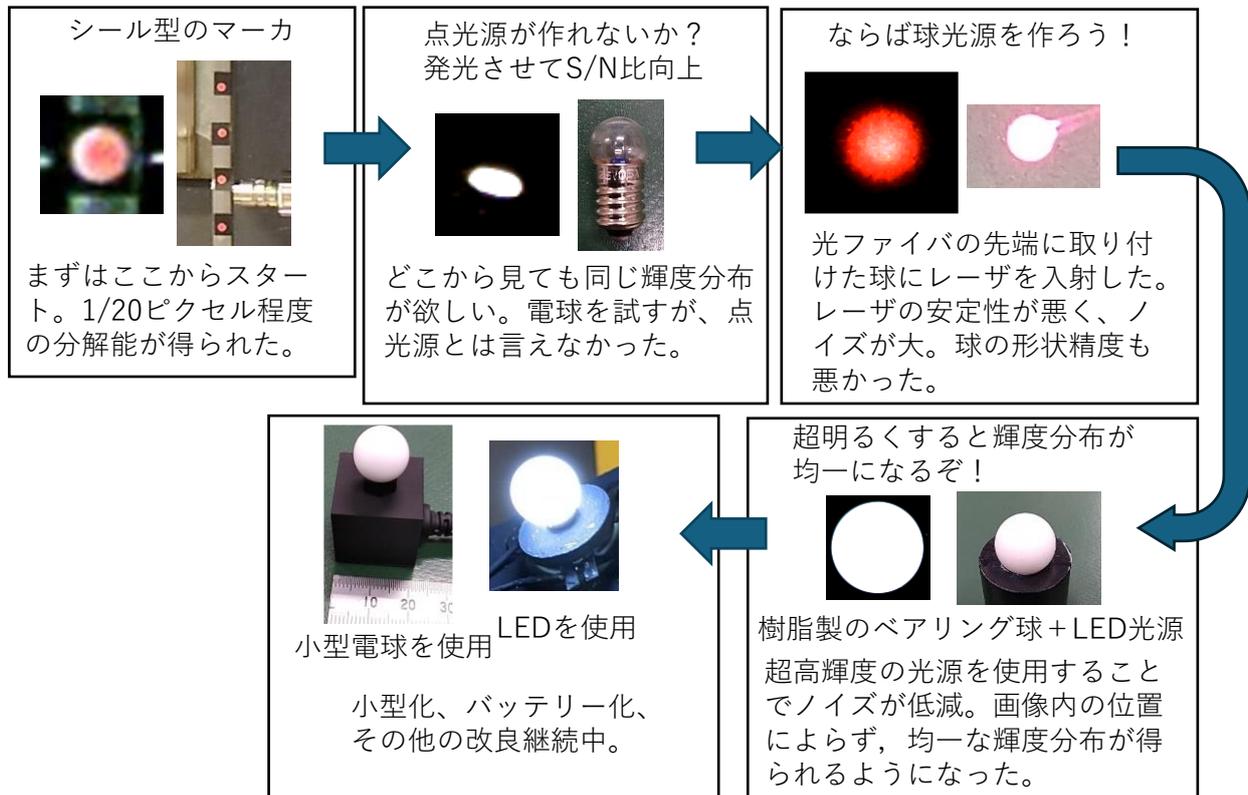


Fig. 3 マーカ開発の経緯。

ブレイクスルーになったのは樹脂製のベアリング球に超高輝度のLED光を入射して光らせる方法でした[1]。球の表面から光を入射したので、球内部の光路長の差によって、球の中央と周辺部で輝度の違いが生じました。このため、斜めから球を撮影すると、撮影角度によって輝度分布が変化してしまいました。このとき、「それなら必要以上に明るくして、イメージセンサを飽和させてしまえば、どこから見ても輝度分布が均一になるのでは？」と思ったアイデアが上手くいきました。輝度分布の変化が無視できるようになったことに加えて、環境光よりも十分に強い輝度になったことでS/N比が向上し、高分解能化と高精度化につながりました。

モーショントラッキングシステムでも発光するマーカを用いている例がありますが、高精度の球をこれほど高輝度で発光させている例は珍しいと思います。本方法によって、室内照明環境下で1/100ピクセルレベルのサブピクセル分解能が得られるようになりました。つまり、100 mm×100 mmの測定範囲で1  $\mu$  mの変位が検出できます。一定以上傾いた方向から撮影すると輝度分布が変化する問題はまだ残っていますが、現状は本方式のマーカを採用して研究を続けています。

#### 4. 1/1000ピクセルのサブピクセル分解能は可能なのか？

$10^{-6}$ 以上のダイナミックレンジを得るために、1/100ピクセルからもう1桁サブピクセル分解能を向上させたいです。しかし、1/1000のサブピクセル分解能は挑戦的な目標で、簡単ではありません。平均化と内挿をつきつめたらどうなるのかと考えると、マーカの画像サイズを大きくすれば参加する画素の数が増えて平均化効果が増大します。また、イメージセンサのビット深度（A/D変換の分解能）を上げると、内挿の精度が上がるはずでです。そこで、簡単なシミュレーションを行って、1/1000のサブピクセル分解能が達成可能かどうかを調べてみました[2]。

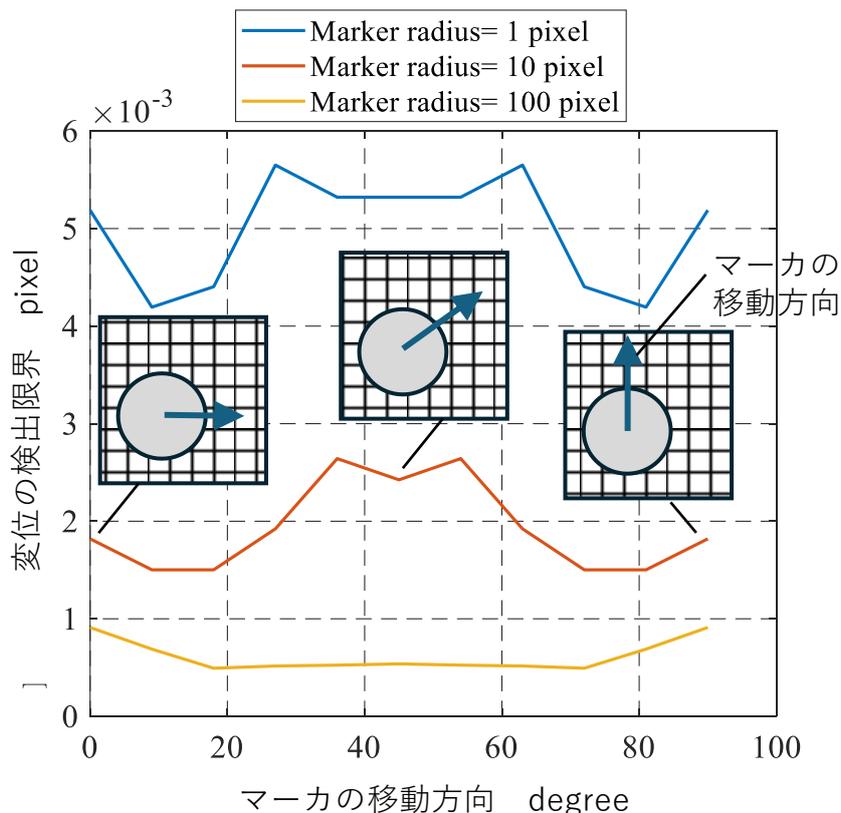


Fig. 4 関数フィッティングにおける変位の検出限界のシミュレーション結果。ビット深度は8ビット。シグモイド関数に基づいて作成した輝度分布を離散化し、再度シグモイド関数でフィッティングして、中心位置を求めるシミュレーションを行っている。

図4に検出限界とイメージセンサ上におけるマーカの移動方向の関係を示します。画像のビット深度が8ビットの場合を想定しており、マーカのサイズを3段階変えています。同図から、マーカ半径を100ピクセルにすると、1/1000ピクセルの検出限界が得られることが分かります。このシミュレーションはノイズの影響などを無視した簡易かつ理想的な状態のシミュレーションです。実際はこれよりも検出限界が大きくなってしまふことを考慮すると、もう少し余裕を持たせる必要

があります。これ以上マーカの大きさを大きくすると測定範囲が狭くなるため、ビット深度を大きくするのがよいと考えています。10～16ビットの深度の画像は市販のカメラでも取得することができるため、1/1000ピクセル達成の可能性はありそうです。これから実験で検証していきます。

## 5. おわりに

本記事で紹介したように、2次元計測での分解能向上は目途がたってきました。しかし、測定精度はまだ全く足りておらず、2～3桁の精度向上が必要です[3, 4]。光学系のひずみやイメージセンサの精度が課題であることが分かってきたので、キャリブレーション法の確立などで対処する予定です。しかし、3次元計測に発展させると誤差要因が増えるため、さらに難しくなります。さらに、リアルタイムでの計測と制御のためには、画像処理速度の向上も課題です。理想的にはターゲットマーカを用いず、工具刃先（になるべく近い地点）と工作物の位置を直接計測したいです。このように、課題とやりたいことは尽きません。画像を用いた高分解能・高精度な運動計測は、実現できれば非常に大きなインパクトがある技術であり、各国でも研究が広がっているため、これからもより一層精力的に取り組む予定です。

## 謝辞

本研究は完全に私の欲求と興味から始めたため、最初はベースとなる技術やノウハウがなく、非常に多数の方々の協力や助言のおかげでここまで発展させられました。画像による動的計測のきっかけをいただいた株式会社東陽テクニカの北田修平様、本研究の関数フィッティング法を共同開発していただいた山梨大学の豊浦正弘先生、球の材質や光源選択への助言をいただいたシーシーエス株式会社の竹田純様をはじめとする皆様、マーカ開発の試行錯誤を精力的に進めてくれた研究室の森幸太郎先生、他の皆様に感謝いたします。

## 参考文献

[1] Kono D, Toyoura M. Luminous target marker for vision based motion error measurement of machine tools. Optical Technology and Measurement for Industrial Applications Conference. SPIE; 2023. pp. 147–151.

[2] Kono D. Fundamental investigation on subpixel resolution in motion capturing by function fitting method. Optical Technology and Measurement for Industrial Applications Conference. SPIE; 2024. accepted.

[3] Mori K, Kono D, Matsubara A. Vision-based volumetric displacement measurement with a self-illuminating target. CIRP Ann. 2023;72: 305–308.

[4] Kono D, Kondo S. Accuracy evaluation of squareness identification by vision-based circular tests for machine tools. CIRP Ann. 2024. accepted.

## Profile

京都大学工学研究科マイクロエンジニアリング専攻精密計測加工学研究室 准教授

1982年、大分市に生まれる。2005年、京都大学工学部物理工学科を卒業。2007年に同大学マイクロエンジニアリング専攻修士課程修了。2010年、同博士課程修了後、博士号取得。2010年から京都大学工学研究科助教、2017年から現職。

## 研究室HP

[https://mmc.me.kyoto-u.ac.jp/index\\_ja](https://mmc.me.kyoto-u.ac.jp/index_ja)