

令和 6 年 6 月 15 日現在

機関番号：82626  
研究種目：基盤研究(B)（一般）  
研究期間：2021～2023  
課題番号：21H03471  
研究課題名（和文）姿勢を可視化するレンズシートを用いた画像計測技術の開発と高精度3次元測位への応用

研究課題名（英文）Development of an Image Measurement Technology Using a Lens Sheet for Visualizing Orientation and Its Application to High-accuracy 3D Positioning

研究代表者  
田中 秀幸（Tanaka, Hideyuki）  
国立研究開発法人産業技術総合研究所・情報・人間工学領域・研究チーム長

研究者番号：70376656  
交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,400,000円

研究成果の概要（和文）：LEAG（lenticular angle gauge）は計測対象物の姿勢を可視化するレンズシートであり、申請者が世界で初めて開発した光学技術である。本研究ではLEAG技術の社会実装を促進し、あらゆる人間や機械が、至る所でカメラによる位置・姿勢計測を行えるようにするための技術基盤を構築した。具体的には、狭い場所にも設置可能な細長い高精度マーカとその計測アルゴリズムを開発した。また、このマーカを電力不要の測位インフラとし、自律航法（PDR）と融合することで、高精度なシームレス3次元測位を行う技術を開発した。

#### 研究成果の学術的意義や社会的意義

これまで、平面パターンの姿勢を単眼カメラ画像から推定する手法はPnP問題を解く手法しか知られていなかった。LEAGによる姿勢推定はこれとは全く異なる新しい原理に基づくものであり、その技術の活用法を明らかにした本研究の学術的意義は大きい。また、開発した高精度マーカは電力不要・通信なしで使い続けることが可能なサステナブルな測位インフラであり、スマートフォンのカメラ等、どのようなカメラでも高精度な測位を実現するものであるため、衛星測位や各種屋内測位手法を補完する新たな測位基盤としての社会的意義も大きい。

研究成果の概要（英文）：The LEAG (Lenticular Angle Gauge) is a lens sheet that visualizes the orientation of the object being measured, representing an optical technology developed by the applicant for the first time in the world. This research aims to promote the social implementation of LEAG technology and to establish a technological foundation that allows various humans and machines to perform position and orientation measurements using cameras everywhere. Specifically, we developed elongated, high-accuracy fiducial markers that can be installed in narrow spaces, along with their measurement algorithms. Furthermore, by utilizing these markers as a power-free positioning infrastructure and integrating them with autonomous navigation (PDR), we developed a technology that enables high-accuracy, seamless 3D positioning.

研究分野：ロボット工学、コンピュータビジョン

キーワード：マイクロレンズアレイ ARマーカ 画像計測 測位 PDR Visual SLAM

## 様式 C-19、F-19-1 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

画像計測において、単眼カメラによる三次元環境・形状復元の分野は、技術的には成熟期を迎えている。しかし、人間が任意の座標系を指定し、カメラ座標系との間の相対位置・姿勢を計測しようとする場合は、依然として何らかの人工的目印が必要である。その目印として有用なものが平面型視覚マーカ（いわゆる AR マーカ）である。種々の AR マーカが提案されてきたが、ホモグラフィックに基づく計測の原理はいずれにも共通しており、それに起因して、「正面方向での姿勢精度悪化」「姿勢の不定性」が大きな問題となり、実用計測ツールとしての利用が難しくなった。これに対し申請者は、レンチキュラーレンズやマイクロレンズアレイを利用し、見る角度に応じて変化する平面パターン（LEAG: Lenticular Angle Gauge）を開発した。そして、LEAG が提供する姿勢情報を用い、全く新しい原理で上記問題を解決する世界初の視覚マーカ（高精度マーカ）を開発、実用化した。高精度マーカは、平面型視覚マーカとしては世界最高精度の計測精度を誇る。しかし、高精度マーカは製造コストが高く、デザインや形状・サイズにあまり自由度がなく、誰もが使えるような技術とはなっていない。LEAG は、画像による姿勢計測をサポートする新しいセンサである。この可能性を最大限に引き出し、あらゆる人間や機械が、LEAG 技術を日常的に利用できるようにするためには、LEAG をより深く理解し、その価値を最大化するためのさらなる研究開発が必要と考えている。

### 2. 研究の目的

LEAG を使って任意の平面パターンを高精度な視覚マーカに変える技術、および「そのマーカと他の測位手法との相補的融合によって高精度な 3 次元測位を行う技術」を開発し、それらの有用性を実証すること、が本研究の目的である。

### 3. 研究の方法

- (1) LEAG の解析・モデル構築：通常の LEAG は回転軸と黒線移動軸が直交しているため、これを直交 LEAG と呼ぶ。ここで、レンチキュラーレンズに対して縞模様を少し斜めにするすることで、回転軸と黒線移動軸が平行となる平行 LEAG を作成することができる。さらに、マイクロレンズアレイを使用することで直交・平行が混在した混合 LEAG を作成することができる。高精度マーカを作成するためには直交する 2 軸周りの姿勢を LEAG で求める必要があるが、これらを使用すれば LEAG の個数や占有面積を減らせるため、LEAG の応用先の広がり期待できる。しかし、これらの LEAG については、レンズや縞模様の仕様に応じてどのようなパターンが生成され、姿勢変化に対してそれがどう変化するか、がまだ明らかになっていない。本課題では、各種 LEAG を解析し、パターン生成モデルを構築することで、LEAG の設計・製造・利用のための理論的基盤を作る。そのモデルを実装したシミュレータを作り、試作した LEAG とパターンを比較することで、モデルの妥当性を検証する。
- (2) 新型 LentiMark とスマートシティタグの開発：LEAG 技術の普及を促進するため、2012 年に開発した正方形の高精度マーカ LentiMark をよりコンパクトにした新型 LentiMark と、より親しみやすいデザインで市街環境との親和性や社会受容性を高めたスマートシティタグ (SCT) を開発する。いずれも従来型 LentiMark よりも低コストに製造可能な設計とする。また、それぞれに対応したマーカ計測ソフトウェアを開発する。SCT では、図柄部を独自の 2 次元 ID コードとして使用する。そのエンコード・デコードのアルゴリズムも合わせて開発する。いずれも平行 LEAG を活用する。
- (3) 自由マーカの生成技術の開発：(1) (2) で培った技術を活用し、標識・ポスター・タイル等から後から LEAG を付加することで任意の平面パターンを高精度マーカ（自由マーカ）に変える技術を開発する。また、その技術をスマートフォンのアプリに実装し、LEAG を用いた自由マーカの生成を誰もが簡単にできるようにする。任意のパターンをマーカとして登録し、LEAG との位置関係を特定するためのパターン認識・マッチング、特徴点抽出、形状解析等の画像処理技術と、(1) のモデルを用いた LEAG 情報の解析、および高精度な姿勢修正アルゴリズムの開発がカギとなる。(2) (3) とともに、従来型 LentiMark と同等の計測精度（位置誤差 計測距離の 1%未満、姿勢誤差 1° 未満）の実現を目標とする。
- (4) 「マーカ計測+IMU のみによる自律航法」による測位技術の開発：IMU（慣性計測ユニット）内の誤差をモデル化し、これとマーカの誤差モデルを用い、計測対象のモデルは利用しない 6 自由度状態推定技術を開発する。カルマンフィルタ等のオンライン状態推定手法を応用する。これにより、「マーカと IMU を一体化し、それを環境に設置したカメラで観測する」という構成、および「カメラと IMU を一体化し、環境に設置したマーカを観測する」という構成のどちらに対しても、同様のアルゴリズムで測位が可能な技術を確立する。この特徴を活用し、マーカ、IMU、カメラの配置パターンを状況や場所に応じて変え、ロバストかつ高精度な位置・姿勢の取得が可能なシステムを開発する。歩行者や移動ロボットを用いた実証実験により、本測位システムの柔軟性および汎用性を実証する。
- (5) 「マーカ計測+xDR」による測位技術の開発：移動体に特化した自律航法である xDR (Dead

Reckoning for X) では、移動距離に比例して1-5%の誤差が累積する。この累積誤差をマーカ測位と組み合わせることでキャンセルし、xDR 単独よりもはるかに高い分解能で移動体を追跡する測位システムを構築する。歩行者 (Pedestrian) 向けの PDR、および車輪型移動体 (Vehicle) 向けの VDR との融合技術を開発する。とくに VDR では、路面状態 (舗装状態や段差、継ぎ目、傾斜の存在など) が重要な情報となる。そこで、マーカ測位との組み合わせにより、測位における位置・姿勢補正と路面状態推定のマッピングを同時に実現する。それぞれの誤差特性を計測し、カルマンフィルタ・パーティクルフィルタ等を用いた統合測位システムを構築する。作成された路面状態マップは、他の車両の位置補正に活用できるよう、(7) の 3 次元地図に登録する。歩行者や小型モビリティの自動誘導を想定した実証実験により、本統合測位システムの有効性を検証する。

- (6) 「マーカ計測+Visual SLAM」による測位技術の開発：単眼カメラによる SLAM は実寸が不明である一方、マーカ単体では地図上の位置を特定できない (周囲環境とマーカのマッピングがされていない)。そこで、双方を相補的に利用し、マーカにより SLAM の実寸環境復元を行いつつ、SLAM を利用したマーカのマッピングを行う手法を開発する。マーカがマッピングされた部分 3 次元地図を(7)の 3 次元地図に統合することで、グローバル座標系でのマーカの設置位置・姿勢を登録することが可能となる。通常の Visual SLAM と環境復元精度の比較を行い、性能を評価する。また、測位デバイスの消費電力削減のため、より計算負荷の少ないスパースな観測データに基づく Visual SLAM の手法を開発する。開発した技術をスマートフォンやウェアラブルデバイスに実装し、歩行者や自動宅配ロボット等を対象とした屋内測位実証実験により有効性を検証する。
- (7) 3 次元精密測位システムの構築：(1)-(6) で培った技術を用いて、3 次元精密測位システムを構築する。環境に設置した複数の高精度マーカ、カメラやスマートフォン等の小型デバイス、マーカ計測や測位計算を行うソフトウェア、およびマーカ情報サーバによって構成される。マーカ情報サーバについては、産総研が整備を進めている 3 次元地図と連携し、マーカのパターンデータとマーカの設置位置・姿勢の登録、およびマーカ情報 (マーカのパターンデータとマーカの ID 番号に対応した設置位置・姿勢のリスト) の取得をユーザが容易にできるようなシステムとする。産総研所内で本測位システムを構築して性能・動作検証、改良を行ったのち、公共スペースにシステムを構築して実証実験を行う。3 次元位置誤差が常時 10cm 以下、姿勢誤差が常時 1° 以下の測位の実現を目標とする。

#### 4. 研究成果

- (1) 新型高精度マーカの開発：図 1 に示す新型高精度マーカ LentiMark-II と LeagTag、およびそれぞれの計測アルゴリズムを開発し、それぞれロボット工学の国際会議の双壁とされる IROS, ICRA で発表した。いずれも、これまで利用していた O-LEAG と合わせて、新開発の P-LEAG を利用することにより、2つの LEAG の平行配置を可能にしたものである。これによって従来の正方形型高精度マーカ LentiMark に代わる多様なマーカデザインが可能になった。LentiMark-II では LentiMark よりもマーカの構成要素をよりコンパクトに実装したデザインを可能にし、LeagTag ではより狭い場所へのマーカ設置を考慮した究極の細長形状のマーカデザインを実現した。

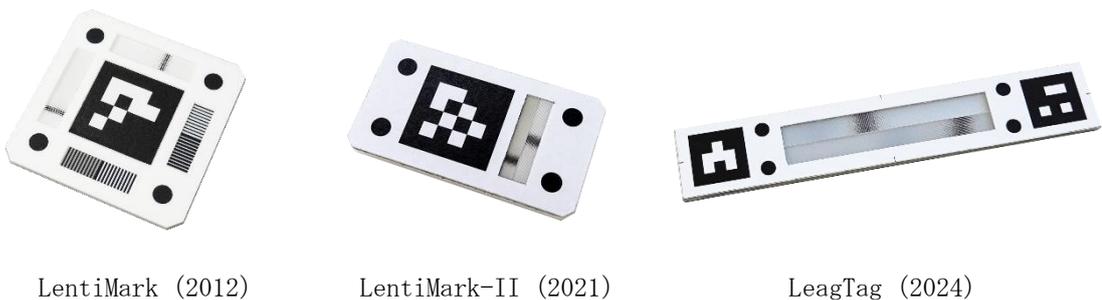


図 1: 高精度マーカのデザインの変遷

- (2) 高精度マーカと IMU のデータを用いた測位手法の開発：IMU とカメラを搭載した肩掛けデバイスを人が装着し、IMU の加速度・角速度のデータとマーカの計測値を融合して移動軌跡を推定する手法を開発した。IMU データにより計算した移動軌跡はセンサのドリフト等の影響で誤差が拡大する。そこで、高精度マーカを用いて自己位置の補正と誤差補正係数の算出をリアルタイムに行い、IMU による自己位置推定誤差を逐次キャンセルすることにより精度良く自己位置を推定することが可能となった。また、高精度マーカを用いたロボットの移動制御を行った。高精度マーカをエレベーターの入り口付近に 1 点設置するだけで、ロボットは入口のフレームに接触することなく安全にエレベーターに搭乗することができるようになった。※ArUco マーカーを用いたロボットの移動制御も行ったが、ArUco マーカーは計測精度の不足により 1 点では自己位置計測が安定しなかったため、2 点設置することで同様の制御ができた。

- (3) 高精度マーカ測位と PDR の融合による測位手法の開発：環境中に設置された光学マーカや BLE ビーコン等に基づいて、IMU を用いた歩行者向け・車両向け自律航法 (xDR) によって生成された相対軌跡を、平行移動・回転・スケール係数・角速度オフセット誤差の自由度で変換して絶対軌跡を生成する手法を開発した。xDR によって生成される相対軌跡は、初期位置・方位が未知であるほか、個人差・個体差によるスケール係数補正が必要であり、また IMU のセンサ誤差による方位角ドリフトの影響を受けるため、系統的な測位誤差を含んでいる。そこで、本研究では、光学マーカや BLE ビーコン等の絶対測位手段を用いて、初期位置・方位を決定し、個人差・個体差補正と方位角ドリフトを、平行移動・回転・スケール・角速度オフセット誤差のパラメータを相対軌跡と各観測点における絶対測位誤差を最小化する最適推定によって、同時実行することを可能とした。BLE マーカを概ね 50 平米につき 1 個程度設置することで誤差 1-2m の測位精度を達成した。ArUco マーカについては、歩行者の移動距離 50m につき 1 回の検知で同程度の測位精度を達成した。
- (4) Visual Inertial Odometry による SLAM 手法の開発と高精度マーカのマッピング手法の検討：ステレオカメラと IMU を用いて環境中に配置されたマーカ地図を生成する SLAM 手法を開発した。環境中に任意にマーカを設置後、マーカ観測による自己位置推定を行うには、マーカの位置・姿勢が記録された地図が必要だが、測量装置等を用いて手でマーカの位置・姿勢を計測し地図を作成するのは多大な工数・労力がかかる。そこで本研究では、ステレオカメラと IMU による Visual Inertial Odometry (VIO) を用いて、カメラの移動量推定を行い、移動の際に撮影されたマーカの位置・姿勢を記録して地図を作成する。ただし、VIO は誤差が蓄積するため、単純に移動量に合わせるだけでは誤差が蓄積された地図ができてしまうため、マーカを再度観測した際に、VIO で得られたマーカの予測位置と、地図に記録されたマーカ位置の誤差を算出し、誤差がなくなるように地図の最適化を行うことで、整合性のとれたマーカ地図を生成することが可能となる。この技術を用いることで、ユーザは環境中の任意の場所にマーカを設置し、カメラで設置したマーカを撮影することで、容易かつ即座に地図を生成でき、マーカを運用できるようになる。
- (5) クラウドサーバを介した測位システムの開発と動作実証：スマートフォンや首掛型ウェアラブルデバイスで取得したデータをクラウドサーバに送信し、サーバ上で測位計算を行い、その結果を送信元のデバイスに返す、という測位システムを構築し、動作検証を行った。その結果、展示会場等の WiFi 通信が混雑した状況を除き、通信が確保できる状態であれば、データ取得から測位結果の受け取りまで 1 秒以内でできることを実証した。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 7件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 K. Ogata, S. Kanazawa, H. Tanaka, T. Kurata	4. 巻 -
2. 論文標題 Basic Study of Upper Limb Movement Estimation and Function Evaluation including Shoulder Girdle by Multi-Sensing Flexible Sensor Wear	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proceedings of 2022 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/IROS47612.2022.9982102	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Hideyuki Tanaka	4. 巻 -
2. 論文標題 Turning Any Object into an Input Device with a High-Accuracy Fiducial Marker	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proc. 2022 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII)	6. 最初と最後の頁 975-976
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/SII52469.2022.9708752	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Kunihiro Ogata, Hideyuki Tanaka, Yoshio Matsumoto	4. 巻 -
2. 論文標題 Simple Three-Dimensional Motion Measurement System using Marker-IMU System	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proc. 2021 43rd Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine & Biology Society (EMBC)	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/EMBC46164.2021.9629829	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Hideyuki Tanaka, Kunihiro Ogata	4. 巻 -
2. 論文標題 A High-Accuracy Fiducial Marker with Parallel Lenticular Angle Gauge	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proc. 2021 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)	6. 最初と最後の頁 8068-8073
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/IROS51168.2021.9635988	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Hideyuki Tanaka, Kunihiro Ogata	4. 巻 -
2. 論文標題 LeagTag: An Elongated High-Accuracy Fiducial Marker for Tight Spaces	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Proc. 2024 IEEE Int. Conf. Robotics and Automation (ICRA)	6. 最初と最後の頁 17438-17444
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Hideyuki Tanaka, Kunihiro Ogata	4. 巻 -
2. 論文標題 Fiducial Marker and Camera-Based Passive High-Accuracy 6-DoF Tracking for Mobile Objects	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Proc. 5th Int. Conf. Control and Robotics (ICCR)	6. 最初と最後の頁 215-220
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/ICCR60000.2023.10444790	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 M. Kourogi, R. Ichikari, T. Miura, S. Ogiso, and T. Okuma	4. 巻 -
2. 論文標題 Vibration-Based Dead-Reckoning for Vehicle Localization	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Proc. 2023 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium (PLANS)	6. 最初と最後の頁 1054-1059
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/PLANS53410.2023.10139992	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計11件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 5件)

1. 発表者名 Kunihiro Ogata, Hideyuki Tanaka, and Masakatsu Kourogi
2. 発表標題 Work Recognition and Movement Trajectory Acquisition using a Multi-Sensing Wearable Device
3. 学会等名 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC) 2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 M. Kourogi, R. Ichikari, T. Miura, S. Ogiso, and T. Okuma
2. 発表標題 Vibration-Based Dead-Reckoning for Vehicle Localization
3. 学会等名 2023 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium (PLANS) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Hideyuki Tanaka, and Kunihiro Ogata
2. 発表標題 LeagTag: An Elongated High-Accuracy Fiducial Marker for Tight Spaces
3. 学会等名 2024 IEEE Int. Conf. Robotics and Automation (ICRA) (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Hideyuki Tanaka
2. 発表標題 Fiducial Marker and Camera-Based Passive High-Accuracy 6-DoF Tracking for Mobile Objects,
3. 学会等名 5th Int. Conf. Control and Robotics (ICCR) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 田中 秀幸, 山下 樹里, 宮田 なつき
2. 発表標題 超微細印刷技術を用いた小型高精度 AR マーカと手指動作計測への応用
3. 学会等名 第29回画像センシングシンポジウム(SSII2023)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 田中秀幸
2. 発表標題 サービスロボットの活用を促進する高精度マーカ
3. 学会等名 日本機械学会東北地区特別講演会「XRとロボティクス」
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 尾形邦裕, 田中秀幸, 鍋嶋厚太
2. 発表標題 共有マーカを用いたロボットの自己位置計測と移動制御
3. 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス 講演会 2024
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 田中秀幸, 尾形邦裕
2. 発表標題 高精度マーカ LeagTag を用いた自律移動ロボットの精密ナビゲーション
3. 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス 講演会 2024
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 K. Ogata
2. 発表標題 Basic Study of Upper Limb Movement Estimation and Function Evaluation including Shoulder Girdle by Multi-Sensing Flexible Sensor Wear
3. 学会等名 2022 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 田中秀幸
2. 発表標題 首掛け型ウェアラブルデバイスを用いた測位と手指の動作認識
3. 学会等名 第23回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会 (SI2022)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 田中秀幸
2. 発表標題 高精度マーカを用いた簡易動作計測
3. 学会等名 第42回バイオメカニズム学術講演会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	尾形 邦裕 (Ogata Kunihiro)  (40641436)	国立研究開発法人産業技術総合研究所・情報・人間工学領域・主任研究員  (82626)	
研究分担者	横塚 将志 (Yokozuka Masashi)  (50709524)	国立研究開発法人産業技術総合研究所・情報・人間工学領域・主任研究員  (82626)	
研究分担者	興侶 正克 (Kourogi Masakatsu)  (80308270)	国立研究開発法人産業技術総合研究所・情報・人間工学領域・主任研究員  (82626)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------