

平成 30 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：2015～2017

課題番号：15H02731

研究課題名(和文) マイクロレンズアレイを用いた高精度視覚マーカの技術基盤構築

研究課題名(英文) Establishment of high accuracy visual marker technology using microlens array

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・研究チーム付

研究者番号：70376656

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,300,000円

研究成果の概要(和文)：申請者が開発した世界最高精度の視覚マーカについて、下記の研究開発を行い、実用化に向けた技術的課題をすべて解決した。ソフトウェア面では、照明変動に対するマーカ認識のロバスト化、位置計測精度の向上、姿勢不定性の除去、を実現した。ハードウェア面では、可変モアレパターンの低反射化、測位用超高精度マーカの開発、長方形型高精度マーカの開発を行った。システム面では、簡易動作計測システム、ロボットアーム制御システム、ARデモシステム等を開発した。これらの成果が、2018年4月の、高精度マーカを用いた計測システムの製品化につながった。

研究成果の概要(英文)：We conducted the following researches and developments on the world's highest accuracy visual marker developed by the applicant and solved all the technical problems for practical application. With regard to software, we realized robust marker recognition for illumination fluctuation, improvement of position measurement accuracy, and elimination of pose ambiguity. Regarding hardware, development of low reflection of variable moire pattern, development of ultra high accuracy marker for positioning, and development of rectangular type high accuracy marker were conducted. For system development, we developed a simple motion measurement system, robotic arm control system, AR demonstration system, etc. These results led to the commercialization of measurement systems using high accuracy markers in April 2018.

研究分野：ロボティクス

キーワード：画像 計測工学 知能ロボティクス 視覚マーカ

1. 研究開始当初の背景

(1) 視覚マーカ (マーカ) はカメラで撮影することでカメラとの相対位置姿勢を測定できる平面パターンである。1996 年よりこれまで様々なマーカが開発され、AR (拡張現実) のみならずロボット制御や計測の分野においても活用されている。しかし従来マーカは、位置姿勢計測に関して下記 3 つの共通の問題を抱えている。①マーカ正面方向での姿勢推定精度が悪い。②姿勢が一意に決まらないことがある。③奥行方向の位置推定精度が悪い。これらは、位置姿勢推定の原理に起因する問題であり、多くの改善策が提案されてきたが、計測原理自体は変わらないため、根本的な解決には至っていない。

(2) これに対し我々は、「見る角度に応じて動くモアレ (干渉縞) パターン: VMP」を用いた新しい原理のマーカ (高精度マーカ) を開発した。マーカ正面からの観測時、従来マーカだと姿勢誤差が 10deg 以上となるような場合でも本マーカは誤差 1deg 未満の姿勢推定を実現し、問題①を解決した。また、問題②③についても本マーカの改良によって解決・改善し、従来は困難だった、視覚マーカを本格的な計測ツールとして活用する道を拓いた。本マーカは多くの企業や研究機関から注目され、ロボット制御、計測、ゲーム等、幅広い分野にわたって早期の実用化が期待されている。

2. 研究の目的

高精度マーカの真の実用化のためには、実環境の厳しい観測条件下でも安定した計測を実現する (「本当に使える」) 技術を確立する必要がある。本研究では、ソフトウェア (マーカ計測アルゴリズム) とハードウェア (マーカ本体) の両面から、実環境における「ロバストかつ高精度な計測技術」と、タスクの要求に応じて「最適なマーカを設計する手法」の研究を行う。こうした技術基盤の構築により、世界に先駆けた独自技術である本マーカの、さまざまな工学システムへの応用と導入を促進する。

3. 研究の方法

(1) 実環境の厳しい観測条件下におけるロバストかつ高精度な計測技術の確立

下記 3 テーマについて研究を行う。

- ① 厳しい環境条件・観測条件に対するロバストなマーカ認識・計測手法
- ② 位置計測精度の向上
- ③ 応用システムの開発と性能検証

(2) アプリケーションごとの要求に対応した最適なマーカ的设计法の確立

下記 3 テーマについて研究を行う。

- ① アプリケーションの要求に応じた最適なマーカ的设计手法
- ② VMP の品質向上のためのマイクロレンズ

アレイの設計

③改良版の高精度マーカの試作と性能検証

4. 研究成果

(1)-① 厳しい環境条件・観測条件に対するロバストなマーカ認識・計測手法

照明条件の変動に対して画像処理の複数のパラメータを自動調整するアルゴリズムを開発した。その結果、照明強度が大きく変動したり、マーカを横断する影があったりするような環境下でも正しくマーカを認識・計測できるようになった。

図 1 に、適切なパラメータ (画像二値化の閾値) 設定により、マーカにかかる影の影響を除去する様子を示す。また、図 2 に、屋外環境における厳しい照明条件下でもマーカ認識・計測が可能であったときの画像を示す。

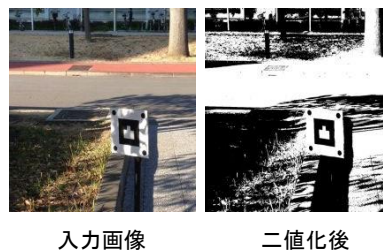


図 1: 適切なパラメータ設定による影の除去

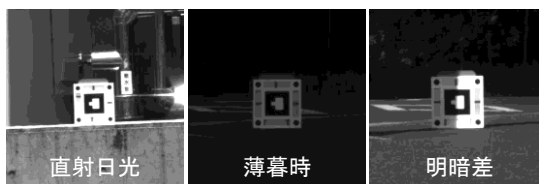


図 2: マーカ認識可能となった画像の例

(1)-② 位置計測精度の向上

従来の AR マーカのように 4 つのコーナー点を使うのではなく、4 つのドット (参照点) を使って位置推定を行うことで、位置計測精度を向上させる手法を開発し、その有効性を実験により示した (図 3)。

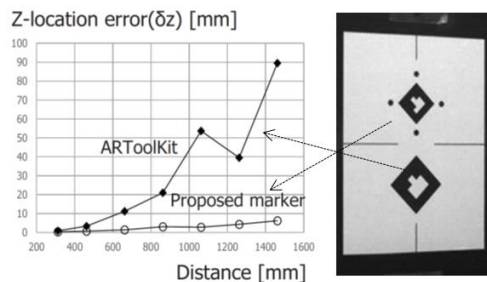


図 3: 4 つのドットを用いた位置推定による奥行位置精度の向上

また、後述の測位用超高精度マーカにおいては、誤差 0.1deg 未満まで推定精度を向上

させた姿勢情報を利用し、角度（3 自由度）を固定したうえで再度再投影誤差の最小化を行うという手法を開発した。その結果、これまで計測距離の 1%程度であった奥行位置推定誤差を、0.1%程度まで減少することに成功した。

(1)-③応用システムの開発と性能検証

【国際宇宙ステーションにおける実証試験】

2015 年 5 月末より 1 年間、国際宇宙ステーションの曝露スペースにおいて、高精度マーカの軌道上環境実証試験を行った。その結果、照明変動が目まぐるしい軌道上環境でもマーカの認識・計測が可能であること、地上計測と同程度の位置姿勢計測が可能であること、紫外線や原子状酸素等、宇宙特有の厳しい環境条件においても、マーカ素材の大きな劣化や性能変化が起きないこと、等を明らかにすることができた（図 4）。

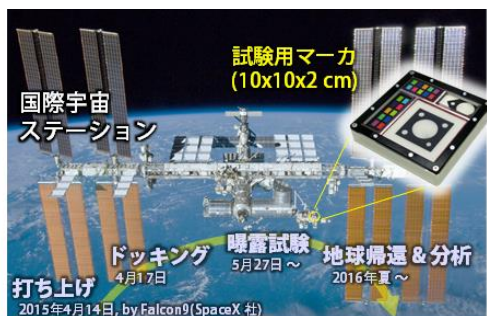


図 4：高精度マーカ（ArrayMark 型）の宇宙実証試験

【簡易動作計測システム】

カメラ 1 台と複数のマーカおよび計算機 1 台からなる、可搬型簡易動作計測システムを開発した（図 5）。各マーカの位置誤差数 cm、姿勢誤差 1deg 程度の 6 次元動作計測が可能であることを実証した。また、本研究の成果は、2018 年 4 月の製品化（(株) フォトロン、6D-MARKER Analyst）へとつながった。



図 5：簡易動作計測システム

【移動ロボット制御システム】

横方向の高精度角度推定に特化した高精

度マーカ（LentiBar）を開発し、センサとしてパンチルトカメラ 1 台のみを搭載した移動ロボットが LentiBar のみで自己位置推定しながら自律移動するシステムを開発した。これにより、狭いドア（左右のクリアランスは数 cm 程度）に対して、垂直にアプローチし、通過するという自律制御が可能であることを実証した（図 6）。



図 6：LentiBar とパンチルトカメラを用いた自律移動ロボットシステム

【ロボットアーム制御システム】

ロボットアームの手先につけたカメラで高精度マーカを観測し、位置姿勢を計測したうえで筒にロッドを挿入する、というタスクを行う制御システムを構築した（図 7）。これにより、従来型マーカでは不可能だったロッド挿入タスクを安全・確実に実行することができるようになった。



図 7：ロボットアーム制御システム

【AR デモシステム】

高精度マーカによってカメラの自己位置を高精度に推定することで、安定した CG 表示を可能にする AR デモシステムを開発した。その結果、従来型 AR マーカを用いていたときはとくにマーカ正面からの観測時に表示が乱れていた CG キャラクターを、高精度マーカを用いることでどこから見ても安定して表示できることを実証できた。

(2)-① アプリケーションの要求に応じた最適なマーカ的设计手法

高精度マーカで使われている VMP（可変モアレパターン）は、回転軸と直交する方向に黒線が移動する。これを直交 VMP と呼ぶ。マーカの縦軸（Y 軸）回りおよび横軸（X 軸）回りの双方の相対角度を同程度に高精度に求めるためには、同じ長さの直交 VMP を縦方向・横方向に直交配置する必要がある。その

ため、高精度マークは正方形とせざるを得ず、デザイン上の制約を受けていた。動作計測で用いるような小型のマークであれば、正方形でも問題はない（むしろ正方形のほうが良い）。しかし、比較的大型のマークの場合、設置場所の多様性に対応するためには、マークを長方形にもデザインできるほうが望ましい（実世界でマークを貼れるような空きスペースはだいたい細長い形状をしているため）。

そこで、回転軸と平行な方向に黒線が移動する VMP（平行 VMP）のプロトタイプを開発した。この平行 VMP と直交 VMP を併用することで、長方形のマークデザインが可能となる。そうした長方形の高精度マークのプロトタイプも併せて開発した。この結果、マークを設置する場所の制約（スペースの大きさと形状）を緩和することが可能となった。図 8 に、開発した長方形マークのプロトタイプを示す。また、図 9 に、平行 VMP の挙動を示す。

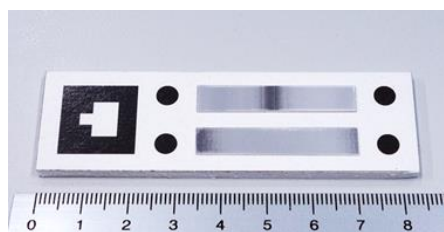


図 8：長方形の高精度マークのプロトタイプ（上段が直交 VMP、下段が平行 VMP）

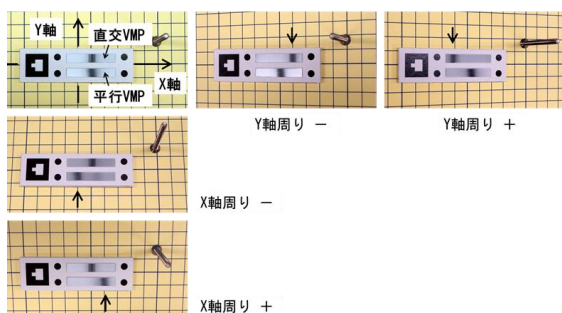


図 9：各軸周りの回転に応じた直交 VMP と平行 VMP の黒線移動の様子

また、本研究課題では、要求される VMP の仕様（認識角度範囲や黒線の移動速度等）に応じて、レンズの仕様および裏の印刷パターンの仕様をどのように設定すれば良いか、に関する、VMP の設計手法を確立した。これにより、アプリケーションの要求に応じた最適なマークを設計することが可能となった。

(2)-② VMP の品質向上のためのマイクロレンズアレイの設計

初期の高精度マーク試作品で用いられていた VMP では、光の当たり方によっては本来の黒線の他にゴーストのような線が現れる、という問題と、レンズ表面の鏡面反射により

黒線が見づらくなる、という問題があった。本研究課題では、レンズ形状および裏の微細パターンの印刷法を改良することにより、これら 2 つの問題を解決することに成功した。この結果、実環境においてロボストに認識・計測が可能で、実用的なマークを製造することが可能になった。

(2)-③ 改良版の高精度マークの試作と性能検証

【測位用超高精度マーク】

これまでの標準タイプの VMP に対し、10 倍の姿勢感度をもつ高感度 VMP を開発した。これを用いることで、姿勢推定誤差 0.1deg 未満の超高精度マークを開発した（図 10）。このマークと (1)-② で述べた位置推定アルゴリズムを組み合わせることで、位置推定精度も 10 倍（位置計測誤差が計測距離の 1% から 0.1% へ）にすることに成功した。その結果、高精度マークをカメラを用いた自己位置推定に適用できるようになった。

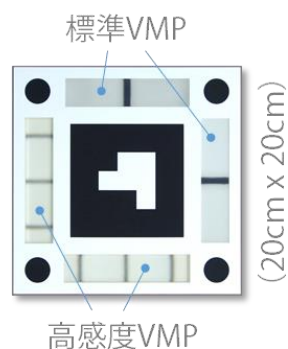


図 10：測位用超高精度マーク

【姿勢反転防止機能付き高精度マーク】

従来型マークの問題の一つとして、「姿勢の不定性」により、推定姿勢があらぬ方向に反転する、という問題があった。これは、高精度マークにおいても、傾きがある程度以上になると発生する問題であった。

これに対し、我々は波型 2 色構造による「反転検知パターン」を開発し、これを組み込んだ高精度マークを開発した（図 11）。これにより、大まかに姿勢がどの方向を向いているかが判別可能となった（図 12）。これに合わせ、姿勢の反転を検知したときに正しい姿勢に修正するアルゴリズムも開発した。この結果、姿勢の不定性の問題を解決することができた。



図 11：反転検知パターン（FDP）（右）と FDP を組み込んだ高精度マーク（左）



図 12：FDP による姿勢の不定性の除去
(下側の FDP の白黒の配置に着目)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 10 件)

- ① H. Tanaka, K. Ogata, and Y. Matsumoto, Solving Pose Ambiguity of Planar Visual Marker by Wavelike Two-tone Patterns, Proc. 2017 IEEE/RSJ Int. Conf. Intelligent Robots and Systems, 査読有, pp. 568-573, 2017, DOI: 10.1109/IROS.2017.8202209.
- ② K. Ogata, H. Tanaka, and Y. Matsumoto, Estimating Hand and Foot Reaction Forces Based on a Generalized Zero Moment Point for Rehabilitation Assist System, Proc. 2017 IEEE-RAS 17th Int. Conf. Humanoid Robotics, 査読有, pp. 283-288, 2017, DOI: 10.1109/HUMANOIDS.2017.8246887.
- ③ H. Tanaka, K. Ogata, and Y. Matsumoto, Improving the Accuracy of Visual Markers by Four Dots and Image Interpolation, Proc. 2016 IEEE Int. Symp. Robotics and Intelligent Sensors, 査読有, 2016, DOI:10.1109/IRIS.2016.8066087.
- ④ H. Tanaka, I. Kajitani, K. Homma, Y. Wakita, and Y. Matsumoto, A Motion Tracker Using High-accuracy AR Markers for On-site Motion Analysis, Proc. The 2015 IEEE Int. Conf. Systems, Man, and Cybernetics, 査読有, pp. 1427-1432, 2015. DOI: 10.1109/SMC.2015.253.
- ⑤ B.K. Kim, H. Tanaka, and Y. Sumi, Robotic Wheelchair Using a High Accuracy Visual Marker LentiBar and Its Application to Door Crossing Navigation, Proc. the 2015 IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, 査読有, pp. 4478-4483, 2015, DOI: 10.1109/ICRA.2015.7139819.
- ⑥ B.K. Kim, H. Tanaka, and Y. Sumi, A Low Cost Robotic Wheelchair System Using a Pan-Tilt Camera and a Visual Marker, Applied Mechanics and Materials, Trans Tech Publications, Switzerland, 査読有, vols. 789-790, pp. 650-655, 2015, DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.789-790.652>.

〔学会発表〕(計 12 件)

- ① H. Tanaka, Solving Pose Ambiguity of Planar Visual Marker by Wavelike Two-tone Patterns, 2017 IEEE/RSJ Int. Conf. Intelligent Robots and Systems, 2017.
- ② H. Tanaka, K. Ogata, and Y. Matsumoto, Improving the Accuracy of Visual Markers by Four Dots and Image Interpolation, 2016 IEEE Int. Symp. Robotics and Intelligent Sensors, 2016.
- ③ H. Tanaka, I. Kajitani, K. Homma, Y. Wakita, and Y. Matsumoto, A Motion Tracker Using High-accuracy AR Markers for On-site Motion Analysis, The 2015 IEEE Int. Conf. Systems, Man, and Cybernetics, 2015.
- ④ B.K. Kim, H. Tanaka, and Y. Sumi, Robotic Wheelchair Using a High Accuracy Visual Marker LentiBar and Its Application to Door Crossing Navigation, The 2015 IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, 2015.

〔図書〕(計 1 件)

田中秀幸, マーカベースの位置合わせ, AR(拡張現実)技術の基礎・発展・実践, 第 1 章 基礎編その 1-1, 科学情報出版株式会社, 2015.

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 3 件)

名称：マーカとマーカを用いた姿勢推定方法及び位置姿勢推定方法
 発明者：田中秀幸
 権利者：産業技術総合研究所
 種類：特許
 番号：PCT/JP2017/038713
 出願年月日：平成 29 年 10 月 26 日
 国内外の別：国内外

○取得状況 (計 5 件)

名称：マーカ
 発明者：田中秀幸, 角保志, 松本吉央
 権利者：産業技術総合研究所
 種類：特許
 番号：特許第 5842248 号
 取得年月日：平成 27 年 11 月 27 日
 国内外の別：国内

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 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・研究チーム付
研究者番号：70376656

(2)研究分担者

角 保志 (SUMI, Yasushi)
国立研究開発法人産業技術総合研究所・ロボ
ットイノベーション研究センター・主任
研究員
研究者番号：30357305

金 奉根 (KIM, Bong Keun)
国立研究開発法人産業技術総合研究所・ロ
ボットイノベーション研究センター・主任
研究員
研究者番号：10415672

松本 吉央 (MATSUMOTO, Yoshio)
国立研究開発法人産業技術総合研究所・ロ
ボットイノベーション研究センター・研究
チーム長
研究者番号：00314534

(3)連携研究者

()

研究者番号：

(4)研究協力者

()