

色相別重畳マーカ HueCode による姿勢推定・物体検出を統合した工場内自律移動ロボット支援システム

A Support System for Autonomous Mobile Robot in a Factory by integrating Pose Estimation and Object Detection using HueCode that Comprises Multiple Markers in Different Colored Layers

○横田将輝*, 岡田佳都*, 大野和則*, 多田隈建二郎*, 田所諭*

○Yoshiki Yokota*, Yoshito Okada*, Kazunori Ohno*,
Kenjiro Tadakuma*, Satoshi Tadokoro*

*東北大学

*Tohoku University

キーワード：可視マーカ (fiducial marker), 位置姿勢推定 (pose estimation), 物体検出 (object detection)

連絡先：〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-1

東北大学大学院 情報科学研究科 応用情報科学専攻 田所研究室

横田将輝, Tel.: (022)795-7025, Fax.: (022)795-7023, E-mail: yokota.yoshiki@rm.is.tohoku.ac.jp

1. 緒言

ロボットが環境中を自律移動して特定の作業を行うためには、ロボットの位置姿勢の推定と、障害物や作業対象の検出が必要である。例えば、ロボットが目的地まで移動するためには、ロボットが環境中のどこにいて、どのような姿勢であるかを推定しながら移動する必要がある。また、移動経路に障害物がある場合は、その位置や向きに合わせて回避する必要がある。

このような位置姿勢推定や物体検出を安価かつ小さな計算コストで行う手法として AR マーカなどの可視マーカを用いた手法がある。あらかじめ環境中や対象物に AR マーカを貼ることで、カメラと AR マーカ間の相対的な位置姿勢を推定できる。また、AR マーカの ID とマーカが貼られた位置情報や物体情報を格納したデー

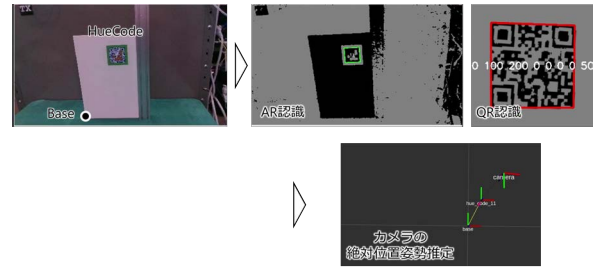


Fig. 1: Absolute pose estimation with HueCode

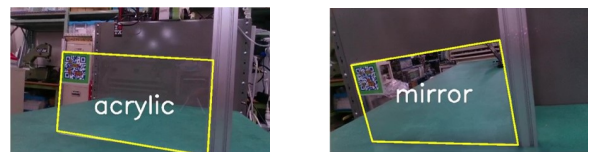


Fig. 2: Object detection with HueCode

データベースを紐づけることでロボットの絶対位置姿勢推定や物体検出が実現できる。しかしデータベースを用いた手法では、AR マーカの ID には限りがあるため位置姿勢推定可能な空間には上限がある。また、データベースへのアクセス権などの制約から外部のロボットは環境中の AR マーカを活用できない。

そこで本稿では、ロボットの絶対位置姿勢取得と物体検出が可視マーカとカメラのみで完結可能な自律移動ロボット支援システムを提案する。本システムでは可視マーカとして、我々が提案している位置姿勢情報と追加情報が同時に取得可能な複合マーカ HueCode [1,2] を用いることで、データベースとの接続無しで絶対位置姿勢推定や物体検出を実現する。また、本稿では工場内の自律移動ロボットを想定し、図1のような絶対位置姿勢推定や、障害物の検出手法を提案する。検証実験では、提案手法を用いて絶対位置姿勢推定や、図2のように一般的な物体検出手法では認識が困難である透明な物体や鏡の検出ができることを示す。

本稿の構成は以下の通りである。2節では位置姿勢推定や物体検出における類似手法との比較について述べる。3節では本システムで用いる色相別重畳マーカ HueCode の概要を述べる。4節では提案する自律移動ロボット支援システムについて述べる。5節では HueCode の認識に用いるデータセットの構築方法について述べる。6節では検証実験について述べる。7節ではまとめと今後の予定について述べる。

2. 関連研究

一般的な位置姿勢推定手法は、絶対位置姿勢を推定可能な手法と相対位置姿勢を推定する手法に大別できる。絶対位置姿勢を推定する手法として、GNSS(Global Navigation Satellite System) や GPS(Global Positioning System) などの衛星測位システムを用いた手法や、位置姿勢推定と地

図構築を同時に行う SLAM(Simultaneous Localization and Mapping) [3], 反射マーカを複数の高速度カメラによりトラッキングするモーションキャプチャ[4]などが挙げられる。課題として、GNSS を用いた手法では屋内など衛生電波が届かない環境では使用できず、SLAM やモーションキャプチャはセンサやカメラが高額である点などがある。相対位置姿勢を推定する手法として、内界センサの値を積分することでロボットの移動量を推定するオドメトリなどが挙げられるが、単体ではロボットの絶対位置姿勢を取得できないため、他の手法と併用して使用されることが多い。

一般的な物体検出手法として、深度センサにより物体形状や距離を計測する手法や、YOLO [5] などの深層学習モデルを用いてカメラ画像から学習した物体を検出する手法が挙げられる。課題として、鏡や透明な物体などはカメラやセンサによって検出することが難しい点が挙げられる。

我々は安価かつ小さな計算コストで位置姿勢推定や物体検出を行う手法として AR マーカなどの可視マーカを用いた手法に着目した。AR マーカを環境中や対象物体に貼ることで、カメラと AR マーカ間の位置姿勢を推定することができる [6]。これは、カメラ画像内の AR マーカの2辺の向きから外積を求めることでカメラと AR マーカ間の相対姿勢が推定でき、事前に与えられた辺の長ささと画像内の辺の長さを比較することでカメラとマーカ間の距離が推定できるためである。

我々は複数の可視マーカを1枚に重ねることで、複数の情報を同時に読み取り可能な複合マーカ HueCode [1,2] を提案してきた。本システムでは HueCode に環境中のマーカ位置や物体情報を格納することで、マーカとカメラのみで絶対位置姿勢推定や物体検出を実現する。

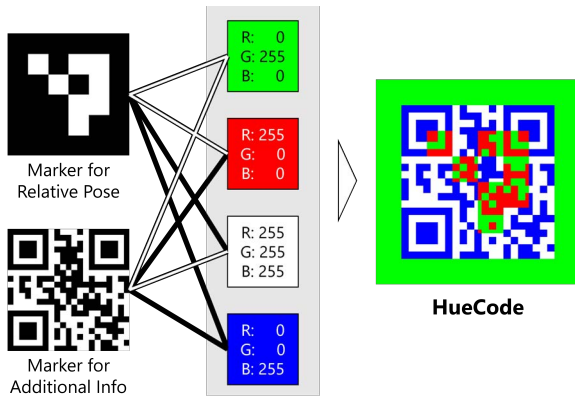


Fig. 3: Generation of HueCode

3. 色相別重畳マーカ HueCode

本節では我々が提案してきた HueCode の概要を述べる．詳細は [1,2] を参考にされたい．

HueCode は複数の可視マーカを異なる色相を用いて 1 枚に重畳することで構成される．これにより，1 枚分の面積で複数の情報を同時に取得できる．重畳する可視マーカとして AR マーカを用いることで，マーカとカメラ間の相対位置姿勢を計算できる．また，QR コードを用いることで数字や文字列などの任意の情報をマーカから読み取れる．さらに，大きさの異なる複数の AR マーカを重畳することにより，認識範囲を向上させたマーカも実現できる [7]．色を用いることでそれぞれのマーカをそのままの大きさで重ねられるため，マーカを単に並べるよりもそれぞれのマーカを大きく表示できる．また，HueCode に用いられるマーカに制約はないため，高性能なマーカが提案されるたびに HueCode の性能も向上可能である．

HueCode の生成方法について説明する．2 種類の白黒マーカを重畳する場合の生成方法を図 3 に示す．重畳後の各画素は白と黒の組み合わせにて表現されるため， 2^2 色で表現される．具体的には AR マーカの白と QR コードの白の組み合わせには緑色を，AR マーカの白と QR コードの黒の組み合わせには赤色を割り振ることで表現している．一般化すると，N 枚の白黒マーカを重畳するには 2^N 色があればよい．

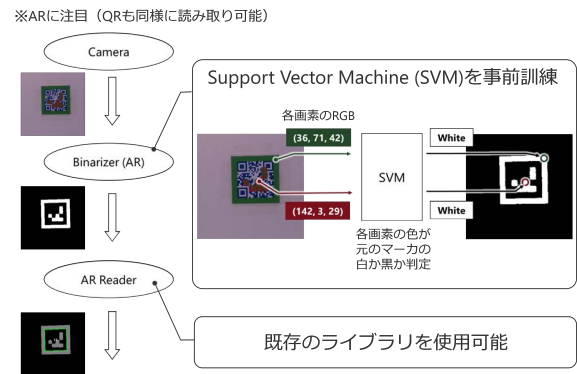


Fig. 4: Recognition of HueCode

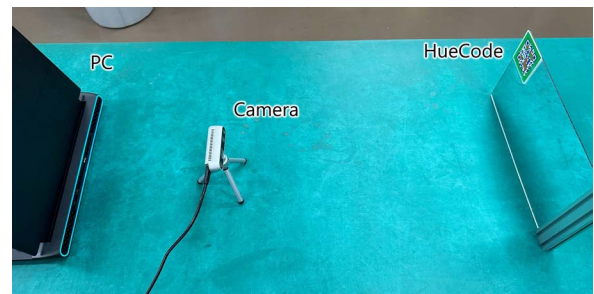


Fig. 5: Minimum system components

次に HueCode の認識方法について説明する．HueCode の認識方法を図 4 に示す．Binarizer ではカメラで撮影した画像の各画素の RGB の値から，その画素をマーカに使用した色のいずれかに分類し，生成時の対応関係から元の白黒マーカを復元する．復元された白黒マーカは既存のライブラリを用いて読取できる．Binarizer には SVM(Support Vector Machine) [8] が用いられている．SVM は機械学習アルゴリズムの一種であり，異なるクラスのデータを分類する超平面を決定するアルゴリズムである．Binarizer の学習データとして，事前にマーカに使用した色を様々な照明下で撮影したデータセットを作成し，それぞれの色が取りうる値を RGB 空間にプロットする．各色をクラスとして SVM を用いて境界面を決定することで，RGB 空間におけるマーカに使用した色の分布を求め，Binarizer で使用する．

4. 提案システム

提案する工場内自律移動ロボット支援システムの構成を図5に示す。本システムの最小構成はカメラ、HueCode、認識用PCである。HueCodeをカメラで撮影し、3節に示す認識方法によりマーカとカメラ間の相対位置姿勢の推定とQRコードに書き込まれた情報の読取を行う。また、HueCodeに重畳するQRコードの情報を変えることで、絶対位置姿勢推定と物体検出の両方に対応する。

HueCodeに基づく絶対位置姿勢推定方法について説明する。HueCodeに重畳するQRコードに書き込む情報は、(A)HueCodeが貼られた絶対位置姿勢、(B)HueCodeに重畳されたARマーカの一辺の大きさ、の2つとした。先に(B)について説明する。2節にて、ARマーカを用いた位置姿勢推定にはARマーカの1辺の長さがあることを述べた。したがって、1辺の長さをQRコードに書き込むことで事前情報なしで位置姿勢推定ができる。(A)の情報よりHueCodeが貼られた位置と姿勢 T_{World}^{Marker} が取得できるため、カメラの絶対位置姿勢 T_{World}^{Camera} が式1を用いて取得できる。

$$T_{World}^{Camera} = T_{World}^{Marker} \times T_{Marker}^{Camera} \quad (1)$$

ここで、 T_{Marker}^{Camera} はARマーカとカメラの相対位置姿勢を表し、ARマーカをカメラで撮影することで求められる。

HueCodeを用いた絶対位置姿勢推定の利点は以下のとおりである。

- ARマーカとQRコードの組み合わせにより、カメラの絶対位置姿勢が取得できる
- データベースや事前情報が不要であり、必要な情報はすべてQRから読み取れる
- 後から変更が必要な場合はマーカの張替えのみで済むため、柔軟な仕様変更に対応できる

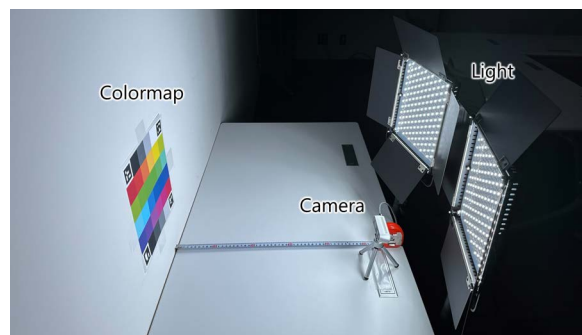


Fig. 6: Setup for dataset construction

HueCodeを用いた物体検出方法について説明する。HueCodeに重畳するQRコードに書き込む情報は、(A)オブジェクト名、(B)オブジェクトの大きさ、(C)HueCodeに重畳されたARマーカの一辺の大きさ、の3つとした。(A)により、マーカが貼られたオブジェクトの種類が取得できるため、そのオブジェクトが障害物なのか、作業対象なのかを判別可能となる。(B)により、オブジェクトの幅や高さ、奥行きなどの障害物回避や物体把持を行うために必要な情報が得られる。HueCodeを用いた物体検出の利点は以下のとおりである。

- 深層学習を用いた手法と異なり、事前の学習やアノテーションが不要である
- 鏡や透明な物体など、既存のセンサでは認識が困難な物体でも検出可能である
- HueCodeを読み取るだけで物体のサイズ・領域が容易に取得可能である

5. データセットの構築

データセットの撮影環境を図6に示す。照明機器 [9] を用いて複数の色を印刷したカラーマップに条件を変えて照明を当てて撮影し、取り得るRGBの値を計測してデータセットを作成した。

撮影条件について、我々が以前作成したデータセット [2] より明るさに頑健な認識が可能となるように、データの撮影方法を変更した。これは、以前のデータセットでは図6のように正面から

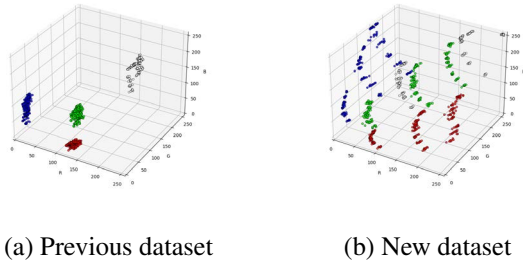


Fig. 7: Improvement of the dataset

照明を当てて計測していたが、照明の影となるようなマーカの配置方法では色の分類がうまくできておらず、認識成功率が低くなっていたからである。この理由として、実際にマーカを認識する際に様々な照明条件下で認識できるよう自動露光を設定し、学習時も条件をそろえるため同じ設定にしていたことが原因であると考えている。学習時は撮影対象がマーカのみであるため明るさを変えて撮影するとマーカに合わせて露光時間が調整されていたのに対し、実際の環境ではマーカ以外の要素に合わせて露光時間が調整されることがあるためマーカが照明の影となると学習時よりも暗い画像が撮影され上手く認識できていなかったと考えた。したがって、本システムでは自動露光をオフに設定しデータセットの構築を行った。また、露光調整がないため、白飛びしたデータが含まれないように、以前は照明の明るさをは上限の5%, 50%, 100%の三種類としていたところを5%, 10%, 15%と設定した。得られたデータセットのばらつきを図7に示す。以前のデータセットよりもそれぞれの色のばらつきが大きいデータが得られていることが確認できるため、より明るさに頑健な認識が可能であると考えられる。具体的な性能評価は今後行う予定である。

6. 検証実験

提案システムを用いて、絶対位置姿勢推定・物体検出が行えることを実験により確かめた。

実験環境について説明する。カメラは Realsense D435i [10] を使用した。用いたカメラは RGB カメラと IR カメラの両方を同時に撮影可能である。マーカの認識には RGB カメラのみを使用した。(解像度 1280×720 , FOV $87^\circ \times 58^\circ$) また、鏡や透明な物体の検出性能を比較するため、IR カメラを用いた深度画像を比較対象とした。

絶対位置姿勢用マーカは1種類、物体検出用マーカは2種類作成した。マーカサイズは1辺50mmとし、反射防止のためラミネート加工を施した。絶対位置姿勢推定用マーカに書き込んだ情報は「0 100 200 0 0 0 50」とした。一つ目の数字0は絶対位置姿勢推定用マーカであることを表す。次の6つの数字は位置(x, y, z)と姿勢(roll, pitch, yaw)を表す。最後の50はARマーカの1辺の長さ[mm]を表す。

物体検出用マーカに書き込んだ情報は「1 acrylic 320 180 3 50」と「1 mirror 320 180 2 50」とした。一つ目の数字1は物体検出用マーカであることを表す。次の文字列は物体の種類を表す。次の3つの数字は物体の大きさ(高さ, 幅, 奥行き)[mm]を表す。最後の50はARマーカの1辺の長さ[mm]を表す。

認識用PCではROS [11] を用いて入力画像からARマーカとQRコードの読取、認識結果の表示を行った。

絶対位置姿勢推定を行った様子を図1に示す。撮影画像からAR, QRの復元を行い、カメラ-マーカ間はARの認識結果から、マーカ-原点間はQRの情報から座標変換を得ることで、原点-カメラ間の絶対位置姿勢を得ることができた。

透明な物体、鏡の物体検出を行った様子を図8に示す。IRカメラを用いた深度画像では透明な物体や鏡を正しく認識できていない様子が見える。透明な物体では赤外線が透過してしまい、鏡の場合は鏡に反射した物体がそのまま深度画像に反映されるため、物体との距離が正しく認識できなかった。一方で、提案手法を用いることで、物体の材質によらず HueCode の情報から

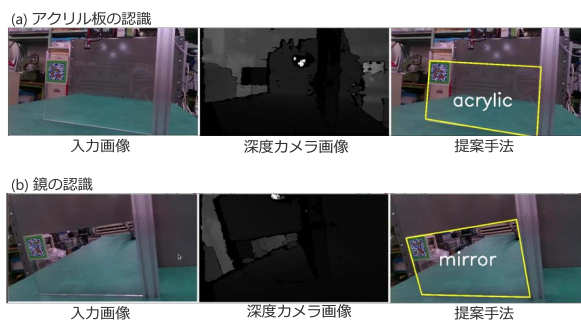


Fig. 8: Comparison with the proposed method and depth camera for acrylic plate and mirror detection

形状を正しく認識できていることが確認できた。

7. 結言

本稿では緒言に述べた、工場内での自律移動ロボットを支援するための、色相別重畳マーカ HueCode を用いた絶対位置姿勢推定手法と物体検出手法を提案した。今後は、位置姿勢推定や物体検出精度の向上や、データセットの違いと認識率の比較、最適なデータセット構築などに取り組む予定である。また、自律移動ロボットへの提案システムの組み込みも組み込みたいと考えている。

謝辞

本研究開発は、総務省の「仮想空間における電波模擬システム技術の高度化に向けた研究開発 (JPJ000254)」によって実施した成果を含みます。

参考文献

- 1) Y. Okada, D. Fujikura, Y. Ozawa, K. Tadakuma, K. Ohno, and S. Tadokoro, “Huecode: A meta-marker exposing relative pose and additional information in different colored layers,” in *2021 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pp. 5928–5934, IEEE, 2021.
- 2) Y. Yokota, D. Fujikura, Y. Okada, K. Ohno, K. Tadakuma, and S. Tadokoro, “Huecode2: An illumination-robust meta-marker overlaying

multiple fiducial markers using optimal color scheme,” in *2022 IEEE 18th International Conference on Automation Science and Engineering (CASE)*, pp. 583–588, IEEE, 2022.

- 3) J. J. Leonard and H. F. Durrant-Whyte, “Simultaneous map building and localization for an autonomous mobile robot.,” in *Proceedings IROS '91: IEEE/RSJ International Workshop on Intelligent Robots and Systems '91*, vol. 3, pp. 1442–1447, 1991.
- 4) A. C. Sementille, L. E. Lourenço, J. R. F. Brega, and I. Rodello, “A motion capture system using passive markers,” in *Proceedings of the 2004 ACM SIGGRAPH international conference on Virtual Reality continuum and its applications in industry*, pp. 440–447, 2004.
- 5) J. Redmon and A. Farhadi, “Yolov3: An incremental improvement,” *arXiv preprint arXiv:1804.02767*, 2018.
- 6) H. Kato and M. Billinghurst, “Marker tracking and hmd calibration for a video-based augmented reality conferencing system,” in *Proceedings 2nd IEEE and ACM International Workshop on Augmented Reality (IWAR'99)*, pp. 85–94, IEEE, 1999.
- 7) 横田将輝, 岡田佳都, 藤倉大貴, 大野和則, 多田隈建二郎, and 田所諭, “AR-HueCode: 多数の AR マーカの色相別重畳により高精度姿勢推定を可能とする複合マーカ,” in **第 22 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**, pp. 1284–1287, 計測自動制御学会, 2021.
- 8) V. Vapnik, *The nature of statistical learning theory*. Springer science & business media, 1999.
- 9) L. PIXEL ENTERPRISE LIMITED, “K80 rgb metal light-pixel is a 14-year company always dedicated to provide quality and smart lighting and audio products for photography and videography creators..” <https://www.pixelhk.com/en/product/K80rgb-Metal-Light-3>. (Accessed on 01/26/2023).
- 10) “Depth camera d435i – intel® real-sense™ depth and tracking cameras.” <https://www.intelrealsense.com/depth-camera-d435i/>. (Accessed on 07/05/2023).
- 11) M. Quigley, K. Conley, B. Gerkey, J. Faust, T. Foote, J. Leibs, R. Wheeler, A. Y. Ng, *et al.*, “Ros: an open-source robot operating system,” in *ICRA workshop on open source software*, vol. 3, p. 5, Kobe, Japan, 2009.