

拡張現実感によるルービックキューブの解法教示システム

橋塚 和典^{*1}

神原 誠之^{*1}

萩田 紀博^{*2}

Abstract — 拡張現実感 (AR) は、現実物体へ直観的な情報提示が可能であることから、作業習得のための教示への応用が期待されている。本研究では、単純な作業の繰り返しであるルービックキューブの解法の習得を目的とした AR を利用した教示システムを提案する。本稿では、作業中の手などの隠蔽に対して、ルービックキューブの形状と色情報を利用した物体の追跡による頑健なルービックキューブの位置姿勢の実時間推定手法、および、推定した結果を用いた、ユーザに解法を記憶し理解させること目的とした情報提示法を提案した。実験では、手による隠蔽が発生した画像での位置姿勢推定実験を行うと共に、実際にルービックキューブを解く教示実験を行い提案手法の有効性を示す。

Keywords : 拡張現実感, 教示システム, 位置姿勢推定, マーカレストラッキング, オクルージョン

1 はじめに

拡張現実感 (AR) は、現実物体への直観的な情報提示が可能であるため、手順が煩雑な特定作業の補助を目的とした AR の研究が盛んに行われている [1][2][3]。しかし、AR による作業補助を行った場合、AR で提示される情報に依存してしまうため、作業内容を習得することは困難である。そのため、手順が煩雑な特定作業の習得を目的とした AR による教示への応用が期待される。本研究では、作業内容や手順などの情報が直観的に提示できる AR を教示に利用することを目的として、2つの手法を提案する。1つ目は、一般的な作業で頻繁に発生する手などによる隠蔽に頑健な現実環境と仮想環境の位置合わせの手法で、2つ目は、提示される情報に依存しないような教示をするための情報の表現方法の提案である。本稿では、作業内容として手などによる隠蔽が多く発生し、かつ、単純な操作の繰り返しであるルービックキューブを解くタスクを想定し、形状が可変であるルービックキューブの位置姿勢を推定し、推定結果から解法を教示をするシステムの構築を行う。

現実環境と仮想環境の位置合わせの手法として、マーカを利用した手法が広く知られている [4]。しかし、マーカを用いる手法では外観の情報を損なう必要があり、教示を目的とした本研究では、外観の情報も重要な要素であるため適していない。したがって、本研究では、教示対象に対してマーカやセンサなどの付加をせず、カメラのみによる処理によりマーカレスな位置合わせを行うことで、外観の情報を損なわないシステムの設計を行う。マーカレスでの位置姿勢推定法で、本研究のように形状が既知の剛体の位置姿勢を推定す

る手法としてモデルベーストラッキング [5] が提案されている。この手法は対象物体の形状が既知であることを利用し、前フレームでの位置姿勢情報と形状情報により現フレームにおける物体の位置姿勢を推定する手法である。しかし、一般に前フレームでの位置姿勢情報が必要であることから、前フレームが存在しない初期フレームはモデル情報のみで推定する必要がある。また、位置姿勢推定が失敗した場合も、前フレームの情報を利用することが出来なくなるため、同様の処理が必要である。さらに、既知の情報として形状情報やルービックキューブの色情報を用いているため手などの隠蔽が頻繁に発生する作業を対象とした本研究では、位置姿勢推定の精度が低くなることが考えられる。したがって、本研究では、手などの隠蔽が頻繁に発生する環境下で、初期フレームでの位置姿勢推定、また、位置姿勢推定が失敗した場合の高速な復帰、および隠蔽に頑健な前フレームの情報を利用した位置姿勢を推定する手法を提案する。それにより、途切れなく位置姿勢が推定できるシステムを構築する。

本研究の目的の教示では、従来行われてきた AR による作業補助の研究のように、作業を効率化させることが目的ではなく、AR による提示情報によってユーザが作業を記憶し理解することで、学習後は AR による提示情報が無い状態においても適確な作業の遂行が可能となることを目的としている。従来研究から、AR は他の手法よりも、単純な物事の記憶に対して有意に働くとされているが [6]、複雑な作業の学習に対しての検証がなされていない。そこで、本研究では、従来一般的に用いられてきた学習法を AR で表現することで、AR による作業学習を可能にする手法を提案する。

以下本稿では、2で提案するルービックキューブの位置姿勢推定手法について、3では教示を目的とした

^{*1}奈良先端科学技術大学院大学

^{*2}国際電気通信基礎技術研究所

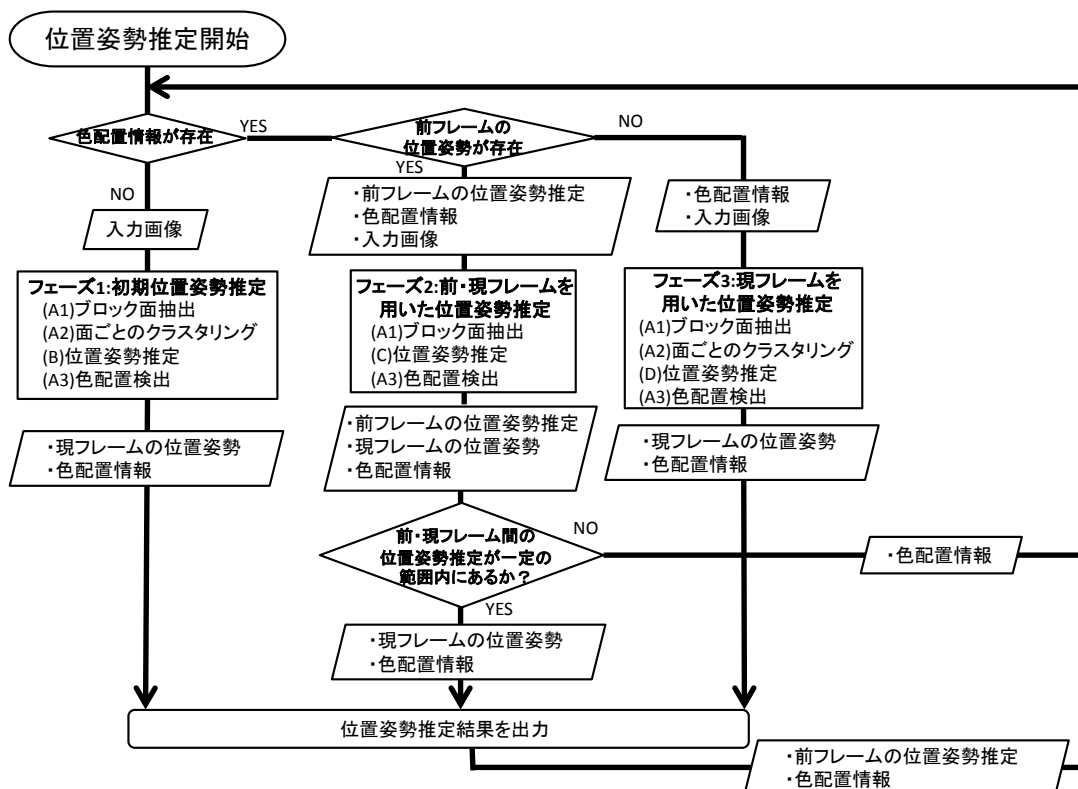


図 1: ルービクキューブの位置姿勢推定処理

情報提示について述べる．4では本システムの実験結果を示し，5でまとめと今後の課題について述べる．

2 ルービクキューブの位置姿勢推定

ARにより教示情報を正確に提示するには，現実環境と仮想環境の位置合わせが必要となる．本研究では，対象となるルービクキューブは多くの隠蔽が発生することから，ルービクキューブの形状と色情報を利用して頑健な位置姿勢推定を行う．2.1では本手法で提案する3つのフェーズの概要について，2.2ではそれぞれのフェーズで行われる処理について，2.3では各処理手法について述べる．

2.1 位置姿勢推定手法の概要

形状と色情報を用いて位置姿勢推定を行うために，カメラから得られたルービクキューブのブロック面の領域と事前に3次元モデルとして与えられた各ブロック面を自動で対応付けする必要がある．本研究では対応付けの方法を状況に合わせて変更することで，高速に安定した位置姿勢推定を行う．また，ルービクキューブの形状が変形する場合，3次元モデルとの対応付けが困難になり，位置姿勢推定の精度が低下する可能性があるため，形状の変形を考慮した対応付けにより位置姿勢推定を行う．

各対応付けについて以下に述べ，それぞれの処理の流れを図1のフローチャートに示す．推定処理は，3

つのフェーズがあり，色配置情報が取得されているか，前フレームで推定が成功しているかどうかにより分類される．

フェーズ1：初期位置姿勢推定

初期推定では前フレームにおける推定情報が存在しないので，現フレームのみと事前知識である3次元モデル情報で初期位置姿勢を推定する．

フェーズ2：前・現フレームを用いた位置姿勢推定

高速に位置姿勢推定をするために前フレームで推定された位置姿勢と取得された色配置情報を用いて位置姿勢を推定する．

フェーズ3：現フレームを用いた位置姿勢推定

ルービクキューブがフレームアウトしてしまった場合や高速に移動して，前フレームで推定された位置姿勢と現フレームのルービクキューブの領域が対応付けられない場合など，前フレームに限らず過去の情報が存在する場合，その情報を利用して現フレームの位置姿勢推定を行う．

各フェーズの流れを図1のフローチャートに示す．初期フレームは前フレームと色配置情報が存在しないためフェーズ1で処理を行う．その後，前フレームと色配置情報を用いてフェーズ2での処理を行う．フレームアウトや高速に動くなどして前フレームと現フレームの正しい対応が困難になり，得られた位置姿勢と前フレームで得られた位置姿勢の差が一定範囲を超

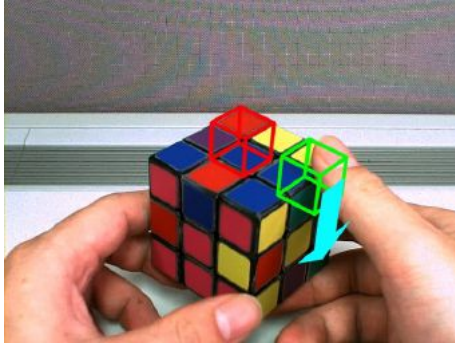


図 2: 重畳表示される情報

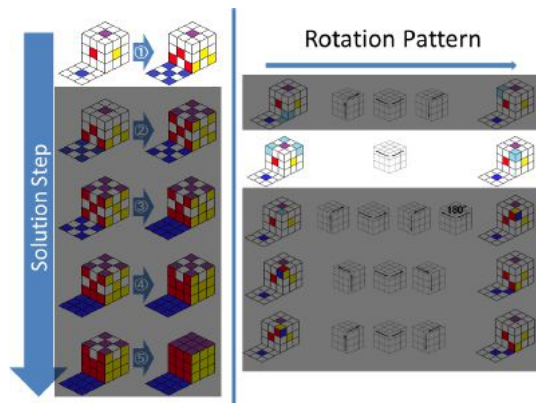


図 3: ルービックキューブの解法の全体図

える場合、位置姿勢推定が失敗したとみなし、色情報のみをもちいてフェーズ 3 の処理に移る。位置姿勢が推定できたらフェーズ 2 の処理に戻る。

2.2 各フェーズの概要処理

各フェーズでの処理について以下に述べる。フェーズ 1: 画像中の全面のブロック面を抽出し (A1), 3 次元モデルと対応付ける候補を減らすために、面まで領域を限定する (A2)。その結果を用いて位置姿勢推定を行い (B), 推定結果から色配置の検出を行う (A3)。

フェーズ 2: 画像中の全面のブロック面を抽出し (A1), 全ブロック面と前フレームの位置姿勢結果を用いて位置姿勢推定を行い (C), 推定結果から色配置の検出を行う (A3)。

フェーズ 3: 処理の流れはフェーズ 1 と同じ流れになっているが、フェーズ 1 で行う位置姿勢推定は (B), フェーズ 2 では入力情報として色配置情報がある位置姿勢推定を行う (D)。

2.3 各処理内容

2.2 で述べた各処理の手法について以下に述べる。

(A1) ブロック面の色を抽出し、各領域の境界を Douglas-Peucker アルゴリズム [7] により直線に近似し、各領域の頂点の数が、4 つになる領域を抽出することで、ブロック面領域のみを抽出する。

(A2) (A1) で得た領域の重心からの距離が最も大きい角度を特徴量とし、面ごとにクラスタリングを行う。

(A3) 推定された位置姿勢から各ブロック面の重心点の色を検出し、その色を各ブロック面の色配置情報とする。

(B) ルービックキューブの位置姿勢を、同一面上のブロック面の重心点とそれに対応する 3 次元モデルの点を 4 点指定することで推定する [8]。4 点指定する組み合わせはそれぞれ 3024 通り存在し、高速に正しい位置姿勢を推定するために、(A2) で得られた領域と 3 次元モデルの重心点は同一面上から面積が大きくなる順に 4 点指定する。

(C) 前フレームから得られるルービックキューブの位置姿勢から現フレームの対応点を決定し位置姿勢推定を行う。対応点は前フレームで決定した対応点から最も近くかつ同じ色の現フレームのブロック面領域を新たな対応点とし、位置姿勢を推定する。この際、前フレームの対応点と、現フレームの対応点の距離が任意に設定した閾値未満のグループと閾値以上のグループでそれぞれ位置姿勢の推定を行い、前フレームの推定結果と最も類似した位置姿勢を現フレームにおける位置姿勢とする。これにより、キューブの形状が変形した場合でも、変形した領域としていない領域を分けて対応付けが可能になり、形状の変化に頑健な位置姿勢推定が可能になる。また、位置姿勢を推定する際、RANSAC アルゴリズム [9] を用いることで、手による隠蔽が発生した際に起こる誤対応に頑健な位置姿勢推定を行う。

(D) 現フレームとルービックキューブの色配置情報から、位置姿勢を推定する。現フレームで検出されている各ルービックキューブの面の各ブロック面の色配置情報から、対応付ける 3 次元モデルのルービックキューブの面を決定する。同一面上の同色である点を誤対応も含めて全て対応点とし RANSAC アルゴリズムを用いることで、誤対応を外れ値として扱うことで頑健に位置姿勢を推定する。

3 教示を目的とした情報提示

本研究では、2 で推定された位置姿勢を利用してルービックキューブの解法を図 2 のように重畳表示させている。ユーザが目すべきブロックに緑色のワイヤーフレームモデルを重畳表示することでブロックの移動推移の把握が容易になっている。さらに、注目すべきブロックが目的の位置に存在しない場合は、目的位置にあるブロックに赤色のワイヤーフレームを重畳表示することで、ユーザは回転の目的の把握が容易になっている。表示する解法は矢印によって重畳表示されており、ルービックキューブの解法として Corner's First (CF) 法を採用している。CF 法は 5 つのステップで構成されており、各ステップは複数の回転から成る

解法パターンに従って回転させることで推移する。したがって本研究では、ユーザは解法パターンと解法パターンを使うタイミングを記憶することでルービックキューブを解くことが目的となる。CF法は他の解法よりも各ステップで用いられる解法パターンの回転数が多くなるが、解法パターンそのものの数は少ないため初心者が作業を記憶し習得するには適切な解法である。本システムでは、回転させるブロック群と方向を矢印により表現しており、ユーザが注目すべきブロックにワイヤーフレームモデルを表示させることで回転の意味理解を容易にしている。また、さらに、ブロックの回転の意味理解を促すために図3のようなルービックキューブの解法の全体図を表示させている。現在取り組んでいるステップと正解である回転パターン以外を暗く表示することで、ユーザが取り組んでいるタスクのステップや回転パターンの把握が容易になっている。以上の情報をユーザに提示するが、全ての情報を常に表示させるとユーザはシステムに依存してしまい、作業内容を記憶し習得することは困難になる。そこで、従来一般的に用いられる作業の学習法をARによって表現することで、作業内容の記憶を促すシステムの構築を行う。

3.1 ARで表現する学習法

現在、一般的に様々な学習法が用いられているが、技術習得の手法として Errorful learning(EF) と Errorless learning(EL) に分けられる [10]。EFは与えられたタスクに対して試行錯誤を繰り返すことで正しい答えを導きだし学習する手法であるが、正しい答えの導き方が整理されていない場合、失敗を繰り返しても正解には導けず、間違った手順の学習をしてしまう可能性がある。一方、ELは初めから正解の手順の情報をユーザに与えて学習をさせ、徐々に与える情報を減少させることで学習する手法であり、正しい答えの導き方が整理されていない場合においても、正しい手順を学習することが出来る。一般的に記憶障害者などに対して用いられる手法であるが、健常者に対しても有効な手法である。本研究では、複雑で記憶する量も多いルービックキューブの解法を対象とするため、初めから正しい手順を記憶し整理することは困難である。そこで、ELによって正しい手順を学習することを目指す。

3.2 Errorless learning へのアプローチ

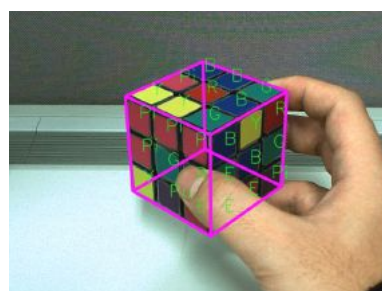
ELによる学習のアプローチとして Progressive Time Delay(PTD) が有効である [11]。従来のARによる情報の提示では、時間の遅延なしで作業支援を行っていたため、ユーザは自分で作業手順を考えることなく作業を行っていた。PTDでは作業の指示を表示させるタイミングをユーザの能力に合わせて遅らせることで、

ユーザ自身で作業手順を考える時間を与え作業を記憶させることが可能になる。本システムでは、図2,3で表示されているルービックキューブの解法をユーザが指定した時間だけ遅らせることができる。ユーザは自身の能力に合わせて遅延時間を設定することで、適切な PTD による学習が行える。

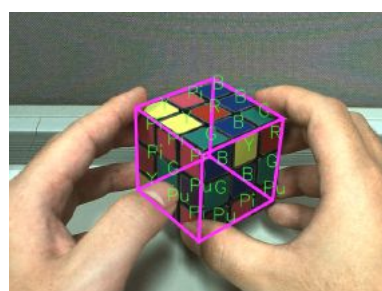
4 実験結果

提案した位置姿勢推定の実験を行った。使用する画像は 640×480 画素であり、図4(a)に示すような卓上での作業環境で実行した。処理計算機の性能は、CPU Intel Core i7 3.00GHz、メモリ 4GB。フェーズ1, 2, 3で行う位置姿勢推定の実験結果をそれぞれ図4(b), (c), (d)に示す。また、形状が変化するルービックキューブに対してフェーズ2によって位置姿勢を推定する実験を連続するフレームに対して行い、結果を10フレーム毎に図4(e), (f), (g)に示す。位置姿勢の推定結果はルービックキューブの輪郭を表現した紫色のワイヤーフレームモデルで重畳表示し、(A3)の色検出の結果は緑色の文字で重畳表示した。それぞれルービックキューブの輪郭とワイヤーフレームモデルが近似している事が分かる。また、ルービックキューブの形状が変化した場合においても、可変していない下辺部のみを用いて位置姿勢を推定することで位置姿勢が継続して推定されていることが分かる。処理時間はフェーズ1の実験では121ミリ秒程度、フェーズ2の実験では24ミリ秒程度、フェーズ3の実験では77ミリ秒程度で推定処理が行えた。また、全面の色検出の結果をルービックキューブの展開図として図5に示す。全ての色が適切に検出された事が分かる。

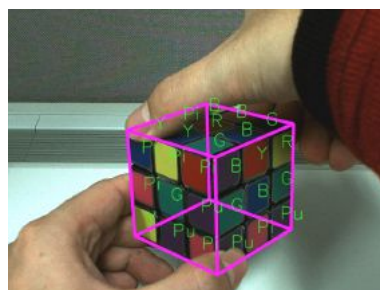
次に、提案したルービックキューブの解法提示の実験を行った。実験環境は位置姿勢推定の実験と同じ環境で行い、フェーズ1,2,3を図1のフローチャートにしたがって切り替えることで継続して位置姿勢推定を行っている。推定された結果を用いて、図6(a)に示すシャッフルされたキューブに対して行った解法提示の結果を図6(b)~(f)に示す。図はそれぞれ第1~第5ステップの経過を表しており、解法にしたがってキューブを回転させていくことで各ステップを推移し、図6(f)ではルービックキューブの色が全て揃っていることがわかる。また、各ワイヤーフレームモデルの情報により、注目すべきブロックとそのブロックの目的位置の把握が容易になっていることがわかる。さらに、図3のようなルービックキューブの解法の全体図を別ウィンドウで表示することで、現在取り組んでいるタスクの位置づけが容易に把握することが出来る。PTDによる遅延時間として3秒の遅延を与え、ルービックキューブを171回転、480秒程度で完成した。



(b) フェーズ 1



(d) フェーズ 3



(g)

[illegible]

5

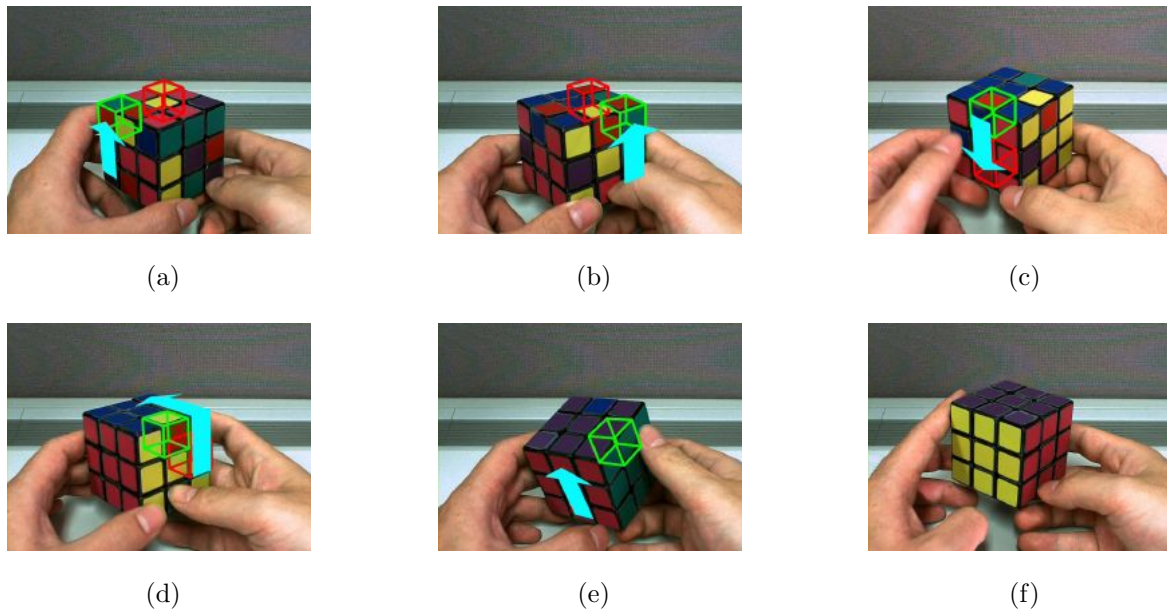


図 6: ルービックキューブの解法実験

5 まとめと今後の課題

本研究はルービックキューブの解法教示への AR の利用を目的とした，位置姿勢推定法を提案し，その結果を用いて実際にルービックキューブを解く実験を行った．実験結果より，初期位置姿勢推定を行った後は高速に位置姿勢推定が可能になり，前フレームで正しい位置姿勢推定が困難であっても現フレームの情報のみで復帰することが可能になった．また，形状が変形した場合においても頑健に位置姿勢推定が可能であることを示した．また，ルービックキューブの教示実験においても解法の指示に従うことでルービックキューブを解くことが出来た．しかし，現状のシステムは単純に解法のみを表示しているだけなので，初期ユーザは解法の意味理解をすることは困難である．したがって，解法の意味理解を促す情報の付加が必要である．また，本研究の目的は AR による教示システムによりユーザが作業内容を記憶し理解することだが，本稿ではそれを検証をしていない．したがって，今後は，AR による教示システムの有用性を検証するために，複数ユーザによる本システムと従来の AR システムや従来の学習法と比較する必要がある．また，本システムでは EL へのアプローチとして PTD を用いたが，遅延時間を単純に試行回数に比例させた時間を用いたので，より妥当性のある時間を設定する必要がある．さらに，EL 以外の手法も表現する事を可能にすることで更なるシステムの向上を目指す．

参考文献

- [1] S.J. Henderson and S.K. Feiner, "Augmented reality in the psychomotor phase of a procedural task", ISMAR'11, pp. 191-200, 2011.
- [2] I. Farkhatdinov and J.H. Ryu, "Development of educational system for automotive engineering based on augmented reality", ICEE&ICEER2009, 2009.
- [3] A. Tang, C. Owen, F. Biocca, and W. Mou, "Comparative Effectiveness of Augmented Reality in Object Assembly", CHI'03, pp. 73-80, 2003.
- [4] H. Kato, M. Billinghurst, I. Poupyrev, K. Imamoto, and K. Tachibana, "Virtual Object Manipulation on a Table-Top AR Environment", ISAR2000, pp. 111-119, 2000.
- [5] A.I. Comport, E. Marchand, M. Pressigout, and F. Chaumette, "Real-time markerless tracking for augmented reality: the virtual visual servoing framework", TVCG, vol. 12, no. 4, pp. 615-628, 2006.
- [6] M. Mathews, M. Challa, C.T. Chu, G. Jian, H. Seichter, and R. Grasset, "Evaluation of spatial abilities through tabletop AR", CHINZ'07, pp.17-24, 2007.
- [7] D. Douglas and T. Peucker, "Algorithms for the reduction of the number of points required for represent a digitized line or its caricature", Can. Cartogr., vol. 10, pp. 112-122, 1973.
- [8] M.A. Abidi, and T. chandra, "A new efficient and direct solution for pose estimation using quadrangular targets: Algorithm and evaluation", PAMI, vol. 17, no. 5, pp. 534-536, 1995.
- [9] M.A. Fischler, and R.C. Bolles, "Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography", CACM, vol. 24, no. 6, pp. 381-395, 1981.
- [10] B. Abdoli, A. Farsi, and F.H. Barani, "Comparing the effects of Errorless and Error ful and fixed practices on learning of throwing task", EJEB, vol. 2, no. 5, pp.1800-1806, 2012.
- [11] G. Walker, "Constant and progressive time delay procedures for teaching children with autism: A literature review", JADD, vol. 38, no. 2, pp.261-275, 2008.