

博士学位論文

視覚と力覚を統合するための
物体インタラクション技術の研究

副題— VOIT (Visual Object-Interaction
Technique)の提案と開発 —

神奈川工科大学

宇佐美 真

平成 29 年度

要旨

本論文は人と特定物体とのインタラクション状態を認識するためのマーカと認識技術に関する研究をまとめたものである。「対象物体と人とのインタラクションに対する反力を発生させながら力覚を含めて1つのカメラで認識・推定する技術」として Visual Object-Interaction Technique (以降 VOIT)を新規開発した。

VOIT はインタラクションを認識するとき新開発の L 字型 2 次元および L 字型 3 次元マーカが装着された物体の「3次元姿勢」と「柔軟性を有する特定物体からの反力として知覚される力覚」を同時に認識・推定する技術である。また著者は本提案の応用としてバーチャルリアリティ(VR)、拡張現実感(AR)を含めた複合現実感(MR)領域へ適用した MR システムを考案・提案し、VOIT は、バーチャル世界に力覚を与えることで MR 体験における視覚と力覚を整合し違和感を縮小することを目的とする技術である。

提案した MR システムは実体物とインタラクションするとき、ヘッドマウントディスプレイ(HMD)上のバーチャル映像表現に対する視覚と実体物を押したときに感じられる力覚の同時知覚を実現する。その結果、「バーチャル世界に力覚を与える」ことから「視覚と力覚の整合による違和感縮小の効果」が得られる。バーチャル映像に対しても人は力覚を期待するため、有ると思って手を差し伸べた映像を押したとき感触がないと違和感が発生し臨場感の低下に繋がるという課題を解決した。

VOIT を確立するために以下 3 つの構成要素技術の開発と評価を実施した。

- ① 3次元姿勢推定と形状変化の認識に対応する L 字型マーカ (2次元, 3次元円柱型および3次元四角柱型) を新規に開発・評価した。
- ② L 字型マーカを、柔軟性を有する実体物に装着することで、姿勢だけでなく反力を発生させながら力覚を同時に推定するための力覚センサ (Passive Force-Sensor, 以降 PFS) を開発・評価した。
- ③ PFS を1つのカメラによるコンピュータビジョン (CV) 方式により姿勢と力覚を同時に推定する技術を開発・評価した。

VOIT では PFS の「マーカ全体画像」の認識から 3次元姿勢を推定し、同時に手や指で PFS が押し込まれた周辺のマーカ歪み量を力覚として推定する。推定された力覚値をユークリッド距離に変換し MR システムにおけるコンピュータへフィードバックしてバーチャル映像の変化に反映できることが特徴である。効果として PFS への押し

込みや姿勢変化のインタラクションと同調して視覚への刺激であるバーチャル映像が歪み、かつ映像の姿勢も追従して変化するためバーチャル映像に対する視覚と力覚の整合がなされ、「特定物体と力覚をともなうインタラクション時における違和感縮小」が達成される。

インタラクションをともなう物体の CV 認識の際、「2次元平面だけでなく3次元形状」への対応性に関する技術要件、および人と物体とのインタラクション時における「物体の動作速度」に関する技術要件が重要であったので、これらの要求性能に着目して VOIT の開発を 2 軸 4 象限マトリクスチャート(縦軸は認識する「物体形状の次元」、横軸は CV 認識に対応する「物体の動作速度」)に技術要件を分類し各象限の要件を満たすとともに体系化・俯瞰しながら研究成果の説明を行い、提案・開発および各種実験による有用性評価に基づく研究成果について第 1 章から第 7 章で構成して論述した。

第 1 章「序論」では、研究の背景と目的、研究方針、創出する世界および、VOIT 確立に必要な技術要件を 2 軸 4 象限マトリクスチャートに俯瞰・分類し論文構成について説明した。3 章から 6 章で各象限の技術要件を満たすことで VOIT を実現する。

第 2 章「関連技術分野の分析」では実体物のコンピュータビジョンによる認識技術および力覚提示技術に関して分析し、本研究で活用するマーカ方式の技術優位性を検証した。VOIT 実現に必要な特定物体の認識および動的形状変化の認識のために最適なビジョンマーカ方式を決定した。

第 3 章「基礎実験」では、物体の 3 次元姿勢推定を実現するために 4 章以降で活用する形状自由度性を有する 1 次元データタグから L 字型 2 次元マーカを開発し実用性評価を行った。L 字型 2 次元マーカを実体物に装着することで、CV 認識による 3 次元姿勢推定が可能であることを実証し精度を確認した。また、マーカの形状変化を CV で認識できることを確認した。実験の結果、L 字型 2 次元マーカが 4 章以降で活用するための基本性能を備えていることが分かった。

第 4 章「幾何学的整合と高速動作物体への対応」では幾何学的整合の観点で、人の動作にともなう実体物の回転方向に対する感覚一致、さらに実体物に模した 3 次元物体にマーカを装着する必要性から「円柱形状の L 字型 3 次元マーカ」を新規開発した。実験により 360 度回転方向からの認識性、継続性および回転方向の誤差を確認した。また人の動きにともなう物体の高速動作の必要性から対象物体の高速動作時にカメラ

のイメージセンサに起因する顕著な画像歪みが発生した場合における物体認識継続性を実験結果から確認した。実験結果より、開発したマーカが幾何学整合性と高速動作対応性を有し、3次元対応できることが分かった。

第5章「背景色対応による使用環境の拡大」では、4章の技術を改良し使用環境を拡大する目的から4章で開発した円柱形状のL字型3次元マーカの形状を変形し「四角柱形状のL字型3次元マーカ」を開発することで背景色依存性問題を解決し、使用環境の拡大を実現した。

第6章「VOITによる視覚と力覚の整合」では視覚と力覚の整合するMRシステムの提案を行い5章までの技術を統合するVOITの開発と評価を行った。インタラクションに反力を発生させながら柔軟物に対する力覚、姿勢推定を同時に行うための力覚センサであるPFSを開発した。PFSの認識により取得した力覚推定値をユークリッド距離に変換しコンピュータにフィードバックするMRシステムの提案とVOITの開発・評価を行い力覚推定の分解能を確認した。その結果、VOITがMRシステムにおける視覚と力覚を整合することで違和感縮小に効果的であることを示した。

第7章「結論」では、本研究の研究全体を総括して結論を述べた。

本研究では特に家庭用やモバイル用途を想定して社会への普及加速に貢献するために、カメラ1つによるコンシューマグレード装置だけで構成する制約の中で実施可能なMRシステムを想定して、必要な要素技術とそれらを統合したVOITの開発・評価を行った。

本研究の成果は2020年に16兆円市場とも言われるMR領域に留まらずコンピュータにおける現実世界の視覚と力覚の整合技術はロボットアームの対人制御やゲーム機のコントローラへの新感覚の創出への貢献も期待しており、さらなる発展を検討していきたい。

目次

第1章	序論	1
1.1	背景と目的	1
1.2	研究方針	11
1.2.1	第3象限：「基礎実験」	11
1.2.2	第2象限：「幾何学的整合」	12
1.2.3	第4象限：「高速動体対応」	13
1.2.4	第1象限：「視覚と力覚の整合」のための VOIT 実現	13
1.3	VOIT が創出する世界	14
1.4	論文構成	17
第2章	関連技術分野の分析	21
2.1	分析の方針	21
2.1.1	実体物の認識技術に関する分析	21
2.1.2	力覚提示技術の分析	33
2.2	まとめ	39
第3章	基礎実験	41
3.1	カラービット方式について	41
3.2	CB の 2 次元化による L 字型 2 次元マーカの開発	44
3.3	L 字マーカの 3 次元姿勢推定	47
3.4	3 次元姿勢推定の実験	50
3.4.1	実験環境	50
3.4.2	L 字マーカの 3 次元姿勢推定精度の測定	52

3.5	歪曲自由度特性の比較評価.....	56
3.6	まとめ.....	59
第4章	幾何学的整合と高速動作物体への対応.....	61
4.1	はじめに.....	62
4.2	従来方式.....	63
4.3	提案手法.....	66
4.3.1	3次元ARマーカの考案.....	66
4.3.2	システム構成.....	68
4.4	実験.....	69
4.4.1	実験用3次元ARマーカの設計と作成.....	69
4.4.2	測定内容と環境.....	70
4.4.3	観測と測定.....	71
4.5	まとめ.....	77
第5章	背景色対応による使用環境の拡大.....	79
5.1	はじめに.....	79
5.2	関連研究.....	81
5.3	提案手法.....	82
5.3.1	想定VRゲームシステム.....	82
5.3.2	3次元ARマーカ+の開発.....	83
5.3.3	システム構成と動作フロー.....	85
5.4	実験.....	87
5.4.1	実験装置.....	87

5.4.2	実験結果	87
5.5	まとめ	90
第6章	VOITによる視覚と力覚の整合	92
6.1	はじめに	92
6.2	関連研究	95
6.3	提案手法	96
6.3.1	力覚センサで用いる柔軟物の選定	97
6.3.2	力覚センサの開発における視覚認識マーカ	99
6.3.3	力覚センサの提案	100
6.3.4	L字マーカと CV 認識と 3次元姿勢推定	101
6.3.5	VR システムのワークフロー	102
6.4	実験	104
6.4.1	PFS としてのスポンジ弾力特性	105
6.4.2	PFS 歪曲度合いの CV 認識	107
6.4.3	セル位置変位量の測定結果	109
6.5	考察	113
6.6	まとめ	116
第7章	結論	117
	謝辞	122
	参考文献	123
	図表目次	129
	論文目録	134

第1章 序論

1.1 背景と目的

デカルトによると「現実」という言葉に与えた哲学的な定義は、「触れた際に抵抗があるもの」であり、見えるけれども手を差し延べると突き抜けてしまうものは「幻」とであるとされる。デカルトの世界観では「幻」であった現象が、現代ではバーチャル世界で表現される物体といえるのではないであろうか。人はバーチャル世界に見える物にも感触を期待するため、有ると思ったバーチャル映像上の物体に対して感触がないと違和感が発生する。そこで著者は、実世界に存在する物体とのインタラクションのようにバーチャル世界にも感触を与えるための技術を検討した。

現代においてバーチャル世界とインタフェースする技術として拡張現実：Augmented Reality (AR)，バーチャルリアリティ：Virtual Reality (VR) また、それらを含める技術である複合現実：Mixed Reality (MR) (以降、MR と記述する場合、AR, VR を含むものとする) が実用化されてきた。これまで MR はコンピュータで合成された映像を、ヘッドマウントディスプレイ(HMD)を介して体験する目的で実用化されてきた歴史から、視覚を刺激するためのディスプレイ技術が先行して進歩を遂げてきた。HMD は頭部に固定して装着され人の身体と一体化して使用される理由から、MR では実世界とのインタラクションにおける 1 人称としての自身の体の存在が大きな意味を持つ。そのため実世界である 3 次元空間との位置関係や自身の身体の 1 部である手や指の感覚とバーチャル映像上の物体との感覚を整合することが必要になってきた。

これら MR 技術を活用したデバイスやサービスの市場は急拡大しており、MR は今後、家庭やモバイル環境に浸透し人々に今までに無い体験や便利な生活をもたらすことが期待されている。調査会社である IDC(International Data Corporation)社が発表した VR/AR 市場予測[1][2]によると、VR/AR 市場は 2020 年には、現在の市場規模である 52 億ドルから 1620 億ドル (16 兆円以上) までに成長すると見込まれ、この成長予測を年率成長率に換算すると年率 181.3%となるとしている。同様に、Digi-Capital 社の 2016 年 1 月の発表[3]によると、AR/VR 市場規模は、2020 年に 1500 億ドル (15 兆円以上) まで成長するとされている。(図[1.1-1])

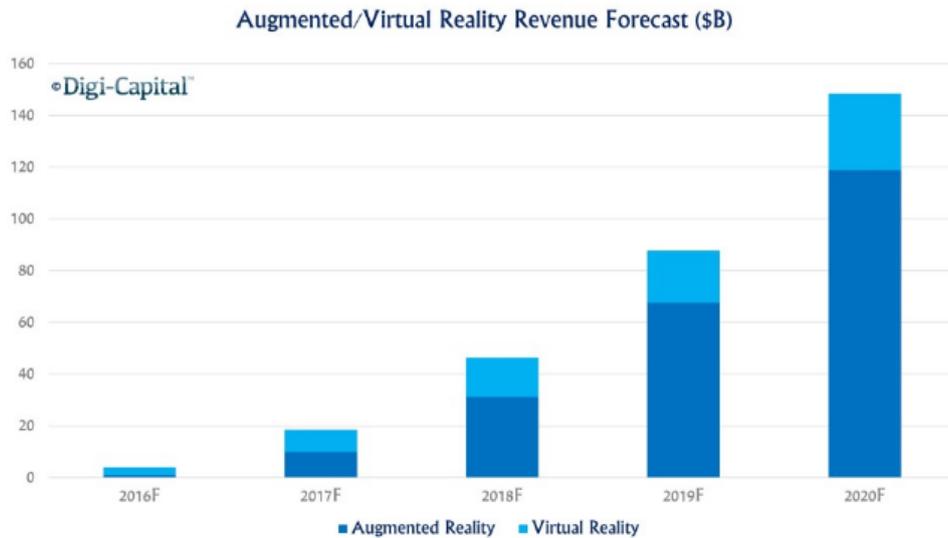


図 1.1-1 AR/VR 市場成長の予測 (Digi-Capital 社 2016)

期待される MR 技術において、実世界に存在する物や環境に対する人のインタラクションに同調して重畳されるバーチャル映像に対する視覚の不整合から違和感を発生させる可能性があり、新技術の受容に対して違和感から生じる拒否反応は実社会への浸透に対して阻害要因となることが懸念される。MR 技術には、HMD 装着時における映像に対する酔いや、装着感なども違和感としてあげられるが、本研究では、視覚と力覚の不整合に起因する違和感に着目して社会に浸透しやすい技術の確立を目指す。

バーチャル世界に見えている柔軟性があるとみられる物体を指のジェスチャで押したときに違和感が発生する状態を図[1.1-2]に示す。違和感とは HMD 上の「視覚」と、実体物に対しては存在するはずの「力覚」（本研究では触覚の 1 部の感覚として力覚に着目する）がバーチャル映像に無いことに起因する感覚の不整合により発生するとみられる。

人と実世界に存在する物（実体物）がインタラクションする状況がコンピュータ上に展開されるバーチャル映像で利用されるとき、実体物にグラフィクス映像が重畳されて HMD を介して見えるとする。この場合、インタラクションにより実体物の位置や姿勢情報に応じてグラフィクスが変化するだけでなく、指で実体物を押したときには動的歪みがグラフィクスにも反映され、同時に指に反力を発生させる必要がある。これを実現するためには実体物の位置、姿勢情報および力覚情報をセンシングして

MRシステムのコンピュータにフィードバックすることでHMD上のバーチャル映像に対する「視覚」と、反力に伴う「力覚」を整合することが必要と考えた。

実体物の位置や姿勢などの状態を「視覚」情報としてカメラで認識し、コンピュータ上で展開する技術であるコンピュータビジョン(CV) (図[1.1-3]) [3][4]と、物体との「力覚」情報をコンピュータに取り込む技術領域は、比較的分離されて研究がなされてきた歴史から、MR領域における技術の融合が未発展である。文献[5]によると、力覚は人体と外界との物理的な相互作用があつて初めて発生するものであり、自身の運動と不可分であることが視覚と著しく異なる。さらに体全身の任意の場所で発生するため、この感覚を人工的に合成することは極めて難しいとされており、力覚をコンピュータに理解させることは技術的難易度が高いといえる。またMRでインタラクションの対象とされる実体物には様々な形状、硬さ、重さ、動きなどの状態が想定される。剛性を有する物体で形状が変化しない場合に比べて、柔軟性を有する特定物体(以降、柔軟物と表記)において形状が動的に変化する時他の物体と区別しながらCV認識を継続することは容易でない。昨今、MRシステム用のコントローラ装置が多数提案されているが、力覚を含めた柔軟物の動的な変化に対応するコンシューマグレードのシステムはみられない。

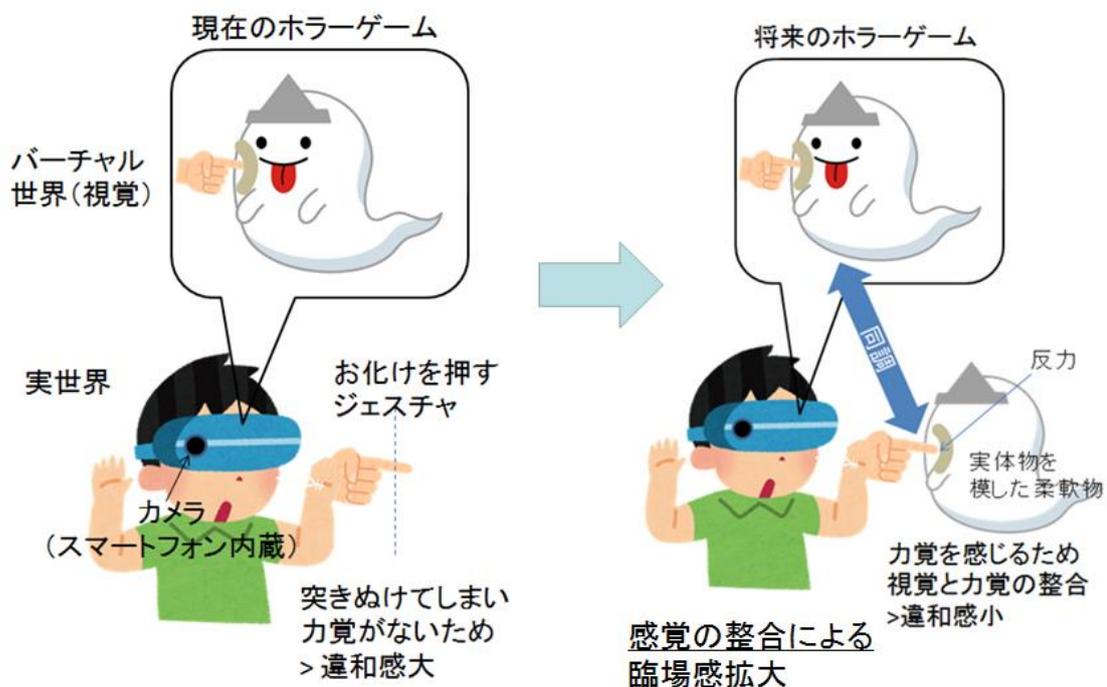


図 1.1-2 バーチャル世界に感触がないときの違和感

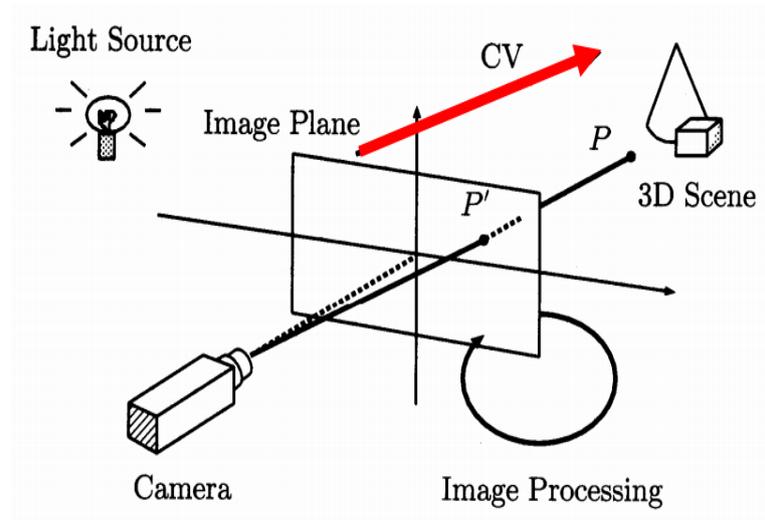


図 1.1-3 コンピュータビジョン(CV) [3]

そこで、本研究では人の五感における「視覚」と「力覚」の整合に着目し、MRにおける視覚（目の受容感覚）を刺激するバーチャル映像と、人と実体物のインタラクション時に発生する力覚の整合を目的とし、効果として違和感の縮小にともなうMRの臨場感向上と普及加速へ貢献するための技術を検討した。そのために必要な要素技術としてCV方式、力覚推定方式の分析を行いながら実体物とのインタラクションをとともなうMRシステムの考案と提案、必要な技術の開発・実験・評価を行った。

さて、MR体験のバーチャル映像において、デカルトのいう突きぬけてしまう「幻」と人の感覚を結び付けて整合させるには、どのような技術が必要であろうか。

下記1)、2)、3)に上記を実現するために必要な技術の概要を記述する。

1) バーチャル映像を模した実体物に対する力覚推定技術

実体物とのインタラクション時において指や手に反力を発生させて、そのときの力覚を推定するには、物理的な仕掛けが必要である。さらに推定された力覚数値をMRシステムのコンピュータにフィードバックすることが必要である。

2) 実体物の姿勢・形状などの状態と人との位置関係を動的に認識する技術

実体物と人がインタラクションする際に、HMD上で表現されるバーチャル映像が、実体物の姿勢や形状、また、位置関係が異なると違和感が発生する。違和感を抑制す

るには、3次元空間における実体物の状態および、人との位置関係を継続して動的に認識し、コンピュータに情報としてフィードバックする技術が必要である。

3) インタラクション状況をバーチャル映像の描画に反映する仕組み

MRシステムは、2) でコンピュータにフィードバックされた情報をもとに実体物の位置、姿勢の変化を動的にバーチャル映像に反映して表示する必要がある。さらに、実体物が柔軟性を有する場合、1) でフィードバックされた力覚推定値と同調して、指で押しこまれたとき柔軟物が歪曲するような形状変化もバーチャル映像の変化として反映してさせなければならない。このとき、指で押し込んだときの反力が力覚として同時に受容されるためバーチャル映像に対する視覚と力覚が整合されると考えられる。

本研究では上述の技術課題を解決し目的を実現するためのMRシステムを考案・提案し、人と特定実体物との動的インタラクション状態を認識する技術を開発・評価した。

そこで本研究ではVOIT (Visual Object-Interaction Technique)と命名する技術の提案・開発・評価を行う。VOITは対象物体と人とのインタラクションに対する反力を発生させながら力覚と物体の姿勢を1つのカメラで認識・推定する技術でありパッシブ型の力覚センサ(PFS: Passive Force-Sensorと命名する独自3次元マーカが装着された柔軟物)と、PFSを認識するCV技術(特定実体物の姿勢、力覚を推定)を統合した技術である。

VOITではPFSと手や指とのインタラクションにおける力覚推定と3次元姿勢推定を同時かつ動的に行う新規性の高い技術を実現する。PFSは電源、電波、ケーブルが不要なコンシューマグレードの装置であり、反力発生とマーカの歪み量センシングを可能とする。PFSとCV技術との融合によりMRにおけるバーチャル映像に対する「視覚」と、実体物への「力覚」を整合する汎用性の高い画期的な技術を考案・提案した。PFSは形状自由度特性を有する3次元形状対応可能な新規開発の3次元対応マーカを装着した柔軟物で構成される。

PFSを把持したとき、操作や指が押し込むような動作を想定するとVOITでは柔軟物の姿勢推定と、反力に応じたマーカの位置変位として歪み度合いを1つのカメラで同時にCV認識する。柔軟物に装着された3次元マーカの歪み度合いから力覚推定を

行いユークリッド距離に変換した数値を力覚推定値として、姿勢推定値も含めてバーチャル映像上の物体へ反映することを想定する。このとき反力に応じた押し込みと同調してバーチャル映像が歪み、かつ姿勢も追従して変化するためバーチャル映像に対する視覚と手や指が感じる力覚が整合する。MR システムでの効果として特定実体物とインタラクションを行うときの違和感縮小と臨場感拡大を見込むとともに、制約条件としてコンシューマグレードの装置のみで実現することにより導入敷居を下げることで社会への普及加速の貢献も目指す。

VOIT では、3次元化されたマーカを特定物体に装着することで剛体だけでなく、対象となる柔軟物が動的に変形する場合でも CV 認識による高いトラッキング継続性を目指す。そこで動的に形状が変化する柔軟物の姿勢と HMD 装着時の人の目線に相当するカメラの位置関係認識と同時に力覚推定するために開発した主な新技術を以下 1)から 3)に示す。人の目線に相当するカメラと物体の位置関係を幾何学的整合と呼び、感覚の整合には重要な要件である。

- 1) 人とのインタラクションに際して、動的に形状が変化する特定物体を継続性して CV 認識し、姿勢推定するための 3次元物体に対応するマーカ技術(L字型 3次元マーカ)の開発と幾何学的整合性の実現と高速認識性の確認。
- 2) 力覚推定するために上記マーカを柔軟物に装着することで、柔軟物を押し込んだとき反力を発生させながら数値化するための力覚センサ(PFS)。
- 3) 融合技術として上記 1)で得た姿勢推定値および 2)の PFS を CV 認識することで取得した力覚推定値をユークリッド距離に変換して、コンピュータへフィードバックすることで視覚と力覚を整合するための技術。

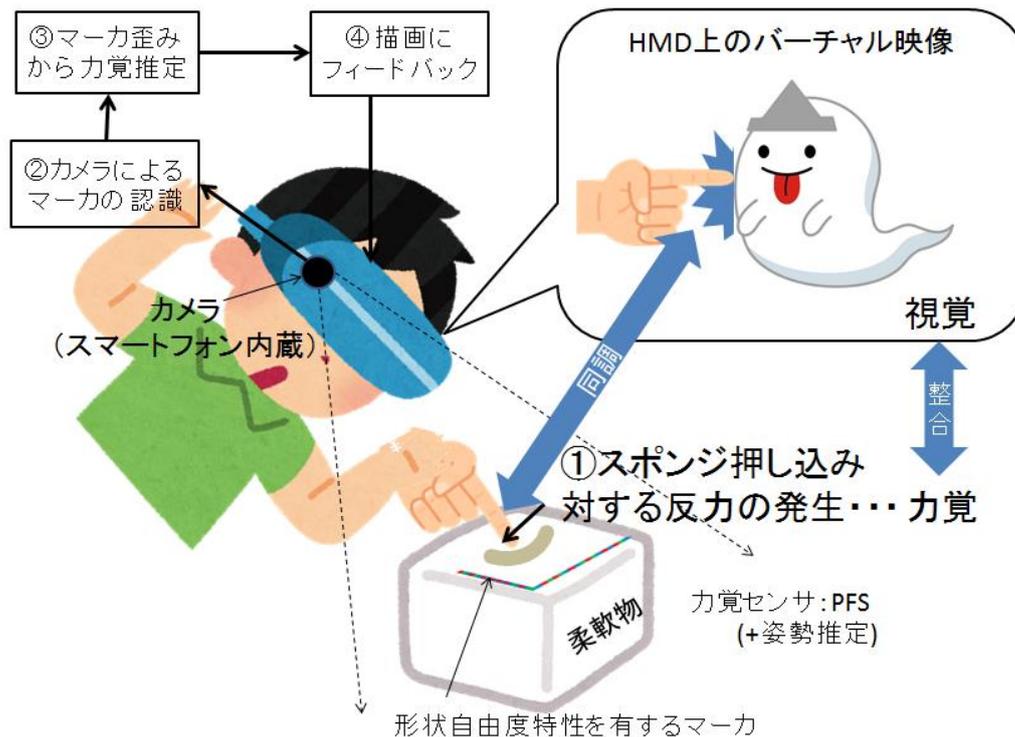


図 1.1-4 VOIT の概要

図[1.1-4]に VOIT の概要を示す．PFS で人の指に反力を感じさせながら力覚推定値と姿勢をコンピュータにフィードバックするシステムから視覚と力覚の整合を行う．以下，手順を①から④の順番で説明する．

- ① 体験者がスポンジにマーカを装着した PFS を把持し，指で押し込むときスポンジの押し込まれた周辺が歪曲してマーカが変形する．
- ② 体験者が頭に装着する HMD 内のスマートフォンに内蔵されたカメラでマーカが認識される．
- ③ スマートフォン内のコンピュータがマーカの歪み量を認識し，その度合いから力覚推定を行う．
- ④ 指が PFS を押し込んだ動作に相当する力覚推定値をコンピュータの描画プログラムにフィードバックし，バーチャル映像の変化として反映する．図におけるオバケはバーチャル映像を表し，PFS の変形と同調してバーチャル映像も変形して描画される．手で PFS を回転・並進させたときの姿勢変化も描画プログラムにフィードバックされる．

上記①のときに体験者は PFS に指を押し込むことで反力を感じている。③で反力に相当する力覚が推定されて④での押し込みに相当するバーチャル映像の変化が同調して HMD 上で表現されて視覚に受容される。

本研究では MR システムを想定して、必要な要素技術とそれらを統合した VOIT の開発・評価を行ったが VOIT はロボットアームの対人制御やゲーム機のコントローラへの新感覚の創出など適用範囲が広く汎用性の高い革新的な技術と考える。下記に本研究で使用する用語の定義に関する記述を行う。

実体物をカメラで視覚認識する技術を以降「CV」と記述。「視覚」と記述した場合は、HMD 上で、人間の目が受容する感覚を意味するものとする。

文献[6]で、神原は AR, VR, MR を分類している。MR は実世界とバーチャル環境を融合する技術であり AR と VR を含むものとされる。本研究における MR, AR, VR の関係性について図[1.1-5]を参照し定義するものとする。



図 1.1-5 MR, AR, VR の関係 [6]

<AR>

目の前の実際の空間情報に情報が重畳される状態のことで、現実の世界に存在する何らかのものをトリガーにし、そこにデジタル情報やアプリを重ね合わせて表示できるもの。特定の物体・図形・形状を認識させたり、GPS、磁気センサなどにより位置・空間・動態を検知させたりすることが実現できるようなものとする。この技術応用はゲーム、物体配置のシミュレーション、歩行ナビゲーションなど多岐にわたる。カメラを通して実世界をバーチャル映像と重畳して見る方式と、Google Glass[7]のように実世界を肉眼でみながらバーチャル映像をディスプレイで視覚する方式、さらに実世界にプロジェクタで映像を重畳させる方式に分類される。

<VR>

現実空間とは異なる空間であってコンピュータグラフィクス(CG)と実写、またはその組み合わせがある。VRはコンピュータの生み出した現実ではない別の人工的な3次元空間に入ることによって現実にはあり得ないことでも体感できるもの。また、一般的に没入タイプのHMD使用を前提としている。このVR空間において体験者である人は、そのバーチャル空間の1部になって動くこともできる。この技術応用はゲームやエンタテインメントは元より、天災・災害のシミュレーション、航空機のシミュレーター、医療・手術のシミュレーション、製品・建築物のプロトタイプ設計などと多岐にわたっている。従来、VRで視聴される映像は、CGが殆どであったが高品質なCGを作成することは容易でない。昨今ではRicoh THETA[8][9]に代表される360度全方位カメラの実用化により、あらかじめ撮影して記録された映像、またはライブで配信された実写映像をHMDのヘッドトラッキング機能をつかって、まさにその場所にいるかのような体験が実用化されてきた。容易にVRコンテンツをコンシューマグレードの装置で作成できるようになったため、実写映像もMRコンテンツに含まれることを強調しておきたい。また、暦本らは、視覚や聴覚だけでなく体感性能の拡張を人間の身体能力や記憶能力の強化を含めてAugmented Human [10]という観点で研究を進めている。

<受動(Passive)>

体験者は提示された空間を受け身で観察して楽しむことを意味する。また提示される刺激に体験者が身体的に反応することも含む。たとえば花火を見上げる、飛んで来るものをよけるような反応を意味する。

<能動(Active)>

体験者がシステムに働き掛ける状態を意味する。またはシステムがそれに反応し、それにまた体験者が反応する状態を意味する。たとえばバーチャル物体に触れる、押す、掴んで投げるような動作で結果的にMRによって人間の五感や感性が拡張・増幅され、眼前に繰り出されるイメージによって実際に体験しているような感覚を味わうことができる。

<臨場感 >

あたかも実際その場に身を置いているかのような感覚を意味する。

<五感>

人は、視覚、聴覚、触覚、味覚、嗅覚の五感を使って実世界とインタフェースしていることが知られている。文献[11]によると、この言葉は、やや厳密さを欠くものであるが社会的にも知名度が高くいろいろな場所で使われているとされているので、本研究においても五感という言葉を使用する。

<力覚>

力覚は五感における触覚に含まれる感覚であり、本研究では「触覚」と呼ばれる人の感覚の中で、その1部として分類される「力覚」のみに着目して研究を行う。

<特定物体>

物体の認識には、特定されて区別された物体を認識する場合と、物体の属性認識を行う場合に分類される。たとえば、人か動物かを認識する場合は物体の属性認識である。この場合、CVでの認識では、まったく同じ形状、色などを有する複数の物体を区別することは不可能である。MRでは体験者がインタラクションする身近な実体物の認識が重要性を持つため、本研究で述べる実体物とは特定物体を意味するものとする。

<コンシューマグレード (の装置) >

日用品または一般の人が容易に購入できる電子機器などを示す。

1.2 研究方針

本節では、研究全体を図[1.2-1]の2軸4象限マトリクスチャートにて俯瞰し、各象限に技術要件を分類してVOITの提案・開発・評価を体系化して研究方針を説明する。縦軸は「物体形状の次元」、横軸は人がインタラクションする際の「物体の動作速度」とした。なお横軸の「低速」には物体の「静止状態」を含むものとする。

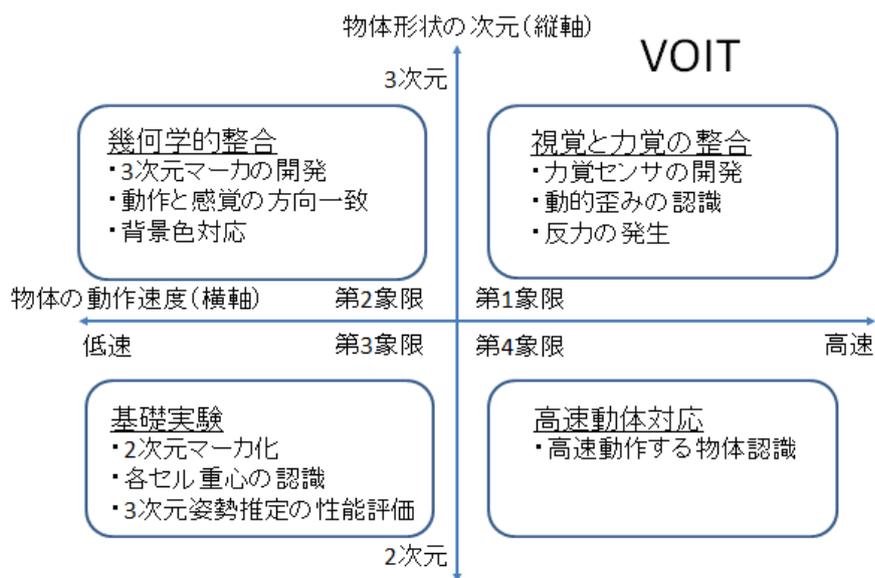


図 1.2-1 研究の全体構成を示す技術要件マトリクスチャート

1.2.1 第3象限：「基礎実験」

第3象限には、マーカの2次元平面での認識対応性に関する技術の評価するための「基礎実験」を技術要件として分類した。物体の形状は「2次元」で、物体の動作速度は「低速」を想定する。含まれる要素技術は以下の2つである。

- ① 1次元データタグであるCBの2次元化によりL字型2次元マーカを構成することで実体物の2次元平面における3次元姿勢推定が可能なことを実証する。そのときの姿勢推定の精度を実験・評価する。
- ② さらにマーカの形状変化がCV認識可能であることを確認し、36個のセルそれぞれの重心のCV認識ができることで、マーカ形状の歪みの測定に関する有効性の確認を行う。

なお、第3象限で対応される技術要件は、第2, 3, 4象限で応用・展開される基礎実験と位置付ける。

1.2.2 第2象限：「幾何学的整合」

第2象限にはマーカのCV認識に関して3次元形状物体へ対応し、CV認識技術の完全性を高めることで「幾何学的整合」を向上させることを技術要件として分類した。物体の形状は「3次元」で、物体の動作速度は「低速」を想定する。

幾何学的整合性は、実世界とバーチャル世界の3次元的な位置合わせを意味しており、実世界の意図した位置にバーチャル物体が存在するような映像を作り出すことは重要な技術要件である。HMDにカメラ機能が含まれ、カメラの向きが人の視線と一致していると想定する。このときCVによる実体物の3次元姿勢推定の完全性と幾何学整合性は同じ意味を持つ。実体物の3次元姿勢推定の完全性が高まることで、実体物に重ねあわせてバーチャル世界の映像が高精度で位置合わせ可能になるためである。3次元形状物体への対応の確認から3次元形状が動的に変形した場合でも3次元認識が継続できることになる。

物体平面に装着された、ARToolKit[12][13][14]に代表される1個の2次元ARマーカを360度回転方向から3次元姿勢推定をシームレスに継続することは困難であるためCV認識の完全性は低い。そこで360度回転方向からの認識を継続することを実現すべき課題とする。また、視覚の感覚的一致の観点では、人が物体を手や指で回転させるとき、実体物の回転方向とバーチャル映像上の物体が同調して同じ方向に回転することも幾何学的整合の完全性を高める観点から重要である。

2次元のARマーカでは、物体の2次元平面へマーカの装着しか想定されていないため、3次元物体の形状に合わせてマーカ形状を変化させることができないという問題があり、これもCVの不完全性として解決すべき課題である、

以下に、2象限における技術要件を満たすために必要な要素技術を示す。

- ① 1象限で性能を確認したL字型2次元マーカを、3次元形状物体への対応と360度回転方向からのCV認識を可能にするため、L字型円柱形状の3次元マーカを開発する。これにより、手や指でマーカを回転させる動作とバーチャル映像が視認されるため感覚的に方向の一致がなされ、幾何学的整合性を高める技術を確立する。
- ② L字型円柱形状の3次元マーカは、背景色によりCV認識が不安定になることがあった。それを解決するために、L字型四角柱形状の3次元マーカの開発を行い、環境色による依存性問題を解決する技術を確立する。

- ③ 上記, 2 種類の 3 次元マーカの開発により, 3 次元形状の物体での CV 認識性を実証する.

1.2.3 第 4 象限: 「高速動体対応」

第 4 象限には, 物体の継続的 CV 認識における「高速動体対応」の技術要件を分類した. 物体の形状は「2 次元」で, 物体の動作速度は「高速」を想定する. 人が物体とインタラクションするとき高速なアクションをとまなう可能性が高く, アクションゲームなどでは, 特にその傾向が強い. 高速動作をとまなう場合でも CV により実体に装着されたマーカは継続して認識されなければならない.

ところが, 従来技術として ARToolKit に代表される 2 次元 AR マーカでは, カメラで撮像された画像が歪むと位置・形状からマーカを認識する 2 次元マーカは認識が破綻する問題があった

以下に, 4 象限における技術要件を満たすために必要な要素技術を示す.

- ① 対象物体の物理的な形状変化という観点の歪みではなく, スマートフォンなどに内蔵される汎用カメラで使用される CMOS イメージセンサの特性に起因して, 高速動体の認識時に発生するローリングシャッタ歪みが顕著に発生しても CV 認識が継続することの確認を要素技術とする. 一旦, マーカが認識されればイメージセンサの特性に起因する画像歪みは補正可能であるため, マーカが高速動体に対応して認識されることが優先される.

1.2.4 第 1 象限: 「視覚と力覚の整合」のための VOIT 実現

第 1 象限には, 第 2, 3, 4 象限で確立された技術を活用し VOIT 実現のための「視覚と力覚の整合」を技術要件として分類する. 物体の形状は「3 次元」で, 物体の動作速度は「高速」を想定する.

以下に, 1 象限における技術要件を満たすために必要な要素技術を示す.

- ① 指で押し込んだときに反力を発生させながら力覚を提示するための力覚センサとして, 柔軟物と 3 次元歪みに対応するマーカで構成される PFS を開発すること.
- ② 反力に相当する力覚を押し込まれた周辺におけるマーカの各セル位置変化を CV 認識する技術の開発をすること. さらに, PFS の動きを認識するため 3 次元姿勢推定を行い, 1 つのカメラで姿勢と力覚を同時に CV 認識する技術の開発.

- ③ 姿勢推定値と、認識されたセル位置の XY 軸における変位量をユークリッド距離に変換して MR システムのコンピュータにフィードバックする技術の提案を行う。
- ④ PFS を活用し押し込まれた周辺のマーカ位置変位量を CV 認識することで柔軟物の動的歪みを力覚として推定する技術を開発した。

1.3 VOIT が創出する世界

図[1.1-3]で示した VOIT 概要図を実世界とバーチャル世界に分けて表現した構成を図[1.3-1]に示す。図の左側には実世界、右側にはバーチャル世界を示す。

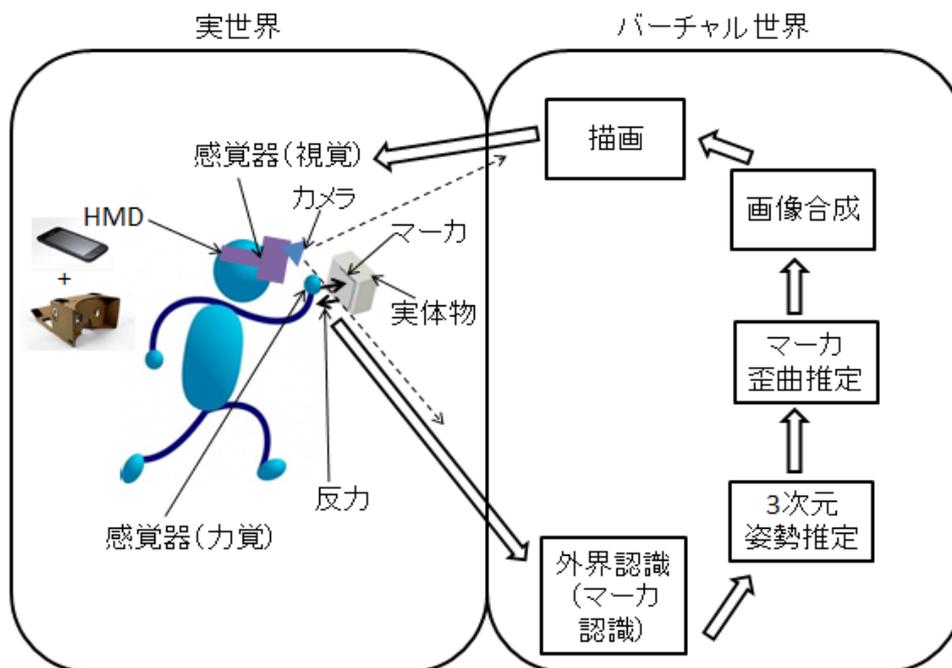


図 1.3-1 VOIT の実世界とバーチャル世界における構成

実世界には、体験者、PFS、紙とレンズで構成される Google Cardboard[15] [16] に代表される簡易型 HMD およびカメラ、コンピュータを内蔵したスマートフォンが存在する。バーチャル世界は、実世界からフィードバックされた情報をスマートフォン内部のコンピュータ処理を示しており実世界とバーチャル世界がループされる仕組みとする。この構成では CV によりマーカを認識し 3 次元姿勢推定を行うことにより実体物と、HMD を装着した体験者の実世界における位置関係の情報が得られる。コンピュータが位置関係を理解することで、マーカを基準に HMD 上のバーチャル映像を幾何学的整合された視覚刺激として体験者に知覚させることが可能となる。次に、PFS からマーカの歪曲度合いから、実体物との反力がともなうインタラクションにつ

いての力覚推定情報をコンピュータが理解する。このとき、マーカが歪曲すれば、その結果、バーチャル映像も歪んで表示されることを想定する。その後、カメラで撮像される外界の情報と人の指によって歪曲されたバーチャル映像が幾何学的整合されて画像の合成がなされた後、描画プログラムに映像が渡されて HMD 上の映像から体験者の視覚に知覚される。

このときスマートフォンがビデオシースルーモード[6]で動作している場合、体験者がカメラを通してバーチャル映像が重畳された外界の実体物を見られる。また体験者が没入型 HMD を装着している場合はバーチャル映像のみが視覚されるが、これも同じシステムで構築される。

人と実体物とのインタラクション結果をコンピュータへフィードバックする際の課題は、MR の実用化以前から存在している。コンソール型ゲーム機用のコントローラを操作する場合、ディスプレイ画面とゲームコントローラのボタン類を同時に視認することは難しかった。Microsoft の Kinect [17][18]の出現により、コンシューマゲームの世界においても画像の深度情報が容易に取得できるようになり、ジェスチャコントロールが可能になった。しかし、ジェスチャで CG とインタラクションしても手や指に反力を感じることはできない。また、従来のコンシューマグレードのコントローラでは繊細な指先のアナログ感覚をコンピュータにフィードバックすることが難しかった。

これまで MR での応用を想定して論述したが、VOIT が創出する他の具体的な応用例を以下の 1), 2), 3)に示す。

1) 触診など医療技術のトレーニング

医師が触診や開腹時に内臓をさわることを人体ではなく、柔軟性を有する模型で行うトレーニングシステムへの応用が考えられる。皮膚や内臓に見立てた柔軟性を有する模型にマーカを装着して、物体を指で押し込む反力を感じながら、力覚推定値を描画プログラムにフィードバックすることで、HMD に表示される内臓などを表現した CG の動きに反映する。人体の代わりに模型を使うことで、トレーニングを容易にする可能性がある。

2) ロボットアームの制御

ロボットアームが柔軟物を潰さずに加減しながら掴んだり押したりする作業の実用化は容易ではない。そこで、CVでマーカの歪曲量から力覚が推定できる場合、ロボットが柔軟物に対して適切な力加減を持って作業できる可能性がある。特に人と対峙するロボットアームなどで有用とみられる。CVの場合オクルージョンの問題があるが、マーカを複数装着することで問題は軽減できるとみられる。

3) 従来式のゲームコントローラやマウスなどに代わるコンピュータとのインタラクション装置への適用

柔軟物をコンピュータに対するコントローラと見立てることで、従来式の入力デバイスと異なるインタラクション方式の創出が期待できる。人がコントローラとインタフェースするとき、指などに反力を与えながら人の微妙な力覚情報をコンピュータにフィードバックできる可能性がある。さらに、スポンジのような素材のPFSは軽量でかつ、ケーブルや電源を必要としないため手に持ってコントローラを操作するとき3次元姿勢推定値を使って6軸の姿勢制御を可能とし、さらに力覚推定を含めることで多様な人の感覚を表現してコンピュータにフィードバックする新しいインタラクション装置の実現が期待できる。

1.4 論文構成

前項までに述べた内容に沿って、本論文の構成について述べる。図[1.4-1]の章立てにより本論文は構成され、図[1.2-1]の、2軸4象限マトリクスチャートで分類した技術要件とともに説明を行う。

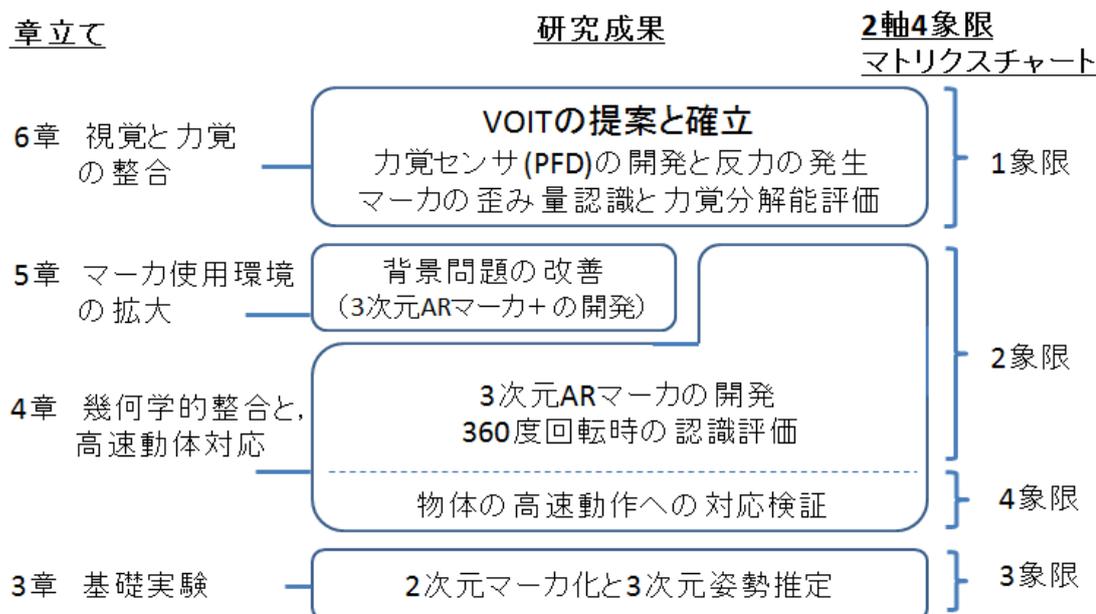


図 1.4-1 章立てと研究成果の俯瞰図

「第1章」では、研究の背景や目的および研究方針について説明した。VOITを開発して行く技術要件を図[1.2-1]の2軸4象限マトリクスチャートに分類して俯瞰して研究方針を説明する。さらに、VOITの世界観としてMR領域以外への幅広い応用展開についても論述する。

「第2章」では、VOITに関連する技術分野の分析を行う。本研究ではVOITに必要な技術として実体物の認識に必要なCVの完全性を高めること、および実体物とインタラクションするときの力覚（触覚に含まれる）の提示技術分野の分析が必要である。歴史的に、これまで比較的分離して異なる目的のために発展を遂げてきたCV技術および力覚推定技術についての分析を行う。CVで物体を認識するにはマーカ式とマーカレス方式が良く知られており分析の結果として、形状自由度特性を有する1次元データタグであるカラービット[19][20]方式の優位性について説明する。

「第3章」では、形状自由度特性を有する1次元データタグであるカラービットの2次元マーカ化を行いCVによるマーカ認識技術について、第4章以降で述べる技術課題に対応するための基礎実験と評価を行う。図[1.2-1]の技術要件においては、3象限に分類される。マーカにより物体の3次元姿勢推定を行うには2次元マーカが必要であるためカラービットをL字型に変形し2次元化することで3次元姿勢推定用のマーカを設計した。実験装置を構成し、2次元平面にマーカを装着してCVによる認識精度を測定することから性能を確認する。2次元マーカを使ったときのCV認識の精度に関して3次元姿勢推定の実験による測定結果は、マーカとカメラの距離300から700mmまでの回転方向および並進方向の誤差が±5%以内であることを確認する。マーカを回転台でX軸方向に回転させたときの傾き限界値は500mm距離にて50度以上であることを確認する。さらに、マーカは36個のセルと呼ぶ領域の連結で構成されるが、36個のセル重心がCV認識されることを確認することで、物体形状の歪みの計測への対応性を検証する。また、付加の実験として従来マーカ方式とマーカの歪曲にともなう認識特性について比較し、従来方式に比べて歪曲自由度が高いことを確認する。実験結果から、第4章以降で活用するL字マーカのCV精度と歪曲自由度特性について有用性評価をおこなう。

「第4章」では、マーカを3次元化しながら幾何学的整合性を実現する目的から、物体に対するCVの完全性を高めることを目指し、第3章で詳述された2次元マーカの3次元化を行った。開発した3次元形状のマーカを応用名称として「3次元ARマーカ」と呼ぶものとする。図[1.2-1]の2象限に分類される技術要件として、人がマーカを装着した物体を回転させたとき360度方向からシームレスに3次元空間でのCVが継続性を持って可能なことを検証する。物体の方向性や姿勢依存度を低く抑えることで幾何学的整合性の向上を実証した。また、汎用カメラに内蔵されるCMOSイメージセンサに起因するローリングシャッタ歪み現象[21][22][23]を図1.4-2に示す。左側の図は静止した扇風機、右側の図は扇風機の羽が回転している状態であり、高速回転している羽の画像に歪みが生じている。高速物体の認識時に画像歪みが生じることで視覚認識を破綻させることがある。そこで図[1.2-1]の4象限に分類される技術要件として、高速回転におけるローリングシャッタ歪み起因で画像が歪曲した場合でもマーカの継続認識を確認することで物体の高速動作時のCV完全性の高さを実証する。ローリングシャッタ歪みが発生した場合でもマーカのCV認識が継続されれば歪みの補正は可能である、360度回転での3次元姿勢推定の回転方向における誤差が10%以内であることを確認する。また、ローリングシャッタ歪みが生じて画像が変形したと

きにおいても 60-RPM の回転速度まで CV 認識のトラッキングが追従できることを確認した。3次元形状での有用性評価より，認識対象である柔軟物が動的に変形したときでも 3次元 AR マーカが対応可能であることを実証しマーカ認識の 3次元対応性を実現する。

「第 5 章」では，第 4 章で開発した 3次元 AR マーカが使用環境の背景によらず CV 認識されるための改良を施し物体の背景とマーカが混色などにより継続性を失うことを防止する手法として「3次元 AR マーカ+」を開発する。3次元 AR マーカ+により，第 4 章の 3次元 AR マーカの使用環境を拡大し，適用範囲の多様化対応技術について論述する。3次元 AR マーカ+の開発により環境色によらずマーカの CV による認識が可能なことを確認する。図[1.2-1]における 2 象限に分類される技術要件とする。

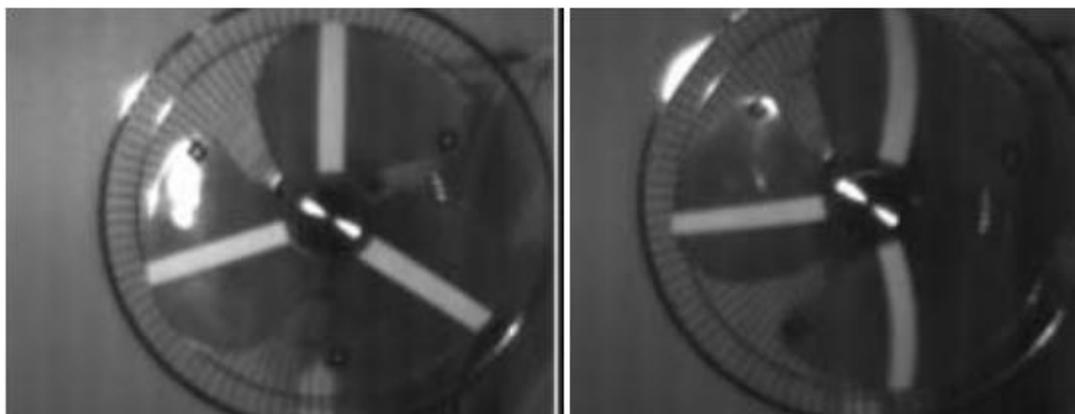


図 1.4-2 ローリングシャッター歪み

「第 6 章」では，視覚と力覚の整合を目指して，第 5 章までに論述した実体物に対応する CV 認識技術を活用して柔軟物とのインタラクション時の力覚推定と 3次元姿勢推定を同時に行う VOIT について論じる。図[1.2-1]においては，1 象限の技術要件と分類した。VOIT により実世界における柔軟物の動的状態と人がインタラクションしたときの力覚推定値をコンピュータへフィードバックする手法を提案する。力覚推定装置として PFS を開発し，人が力覚をともなう実体柔軟物を模して開発した PFS とのインタラクションにおいて反力を感じながら力覚推定値を得るための実験，実装と評価をおこなう。MR におけるバーチャル映像の動きと物体インタラクションにお

ける力覚が整合するため、MR 体験における違和感の縮小効果を期待する。VOIT ではセンシングデバイスはスマートフォン等に内蔵された汎用カメラのみであることからスマートフォンにソフトウェアを実装し動作検証を行い、家庭用やモバイル用途でも活用可能なことを実証する。PFS の力覚推定分解能を確認することで力覚推定結果をコンピュータにフィードバックできることを実証する。さらに、水平、垂直の押下にもなうセル変位量をユークリッド距離に変換することでフィードバック数値を示す方式を提案する。

「第7章」では、結論として本研究で得られた成果を要約し、幅広い分野に応用することで様々な場面における VOIT 方式の活用が市場拡大に貢献できることを記述する。

第2章 関連技術分野の分析

本章では VOIT 実現に必要な、物体を視覚認識する技術であるコンピュータビジョン(CV)技術と力覚推定技術に着目し関連技術と応用領域に関する分析を行う。力覚は触覚の1部の感覚として分類されるため、力覚を含む触覚提示・推定分野についても分析を行う。

2.1 分析の方針

MR 技術において、実体物とのインタラクションとバーチャル映像の同調により視覚と力覚の整合を実現するために本研究では VOIT を提案するが、実体物と人との姿勢など幾何学的関係だけでなく力覚推定も同時に CV 技術を活用して行う。歴史上、CV 技術と力覚を推定するための力覚提示技術は目的が異なる領域にて比較的分離して研究がなされてきた。そこで本節では実体物の CV 認識と力覚提示技術に分けて説明を行う。

2.1.1 実体物の認識技術に関する分析

本研究で必要とされるコンピュータによる実世界での物体認識技術には、イメージセンサを内蔵したカメラを用いる CV 方式以外にも選択肢が存在する。図 2.1-1 は、物体認識技術に関する過去、現在、未来を俯瞰したもので、縦軸には物体の3次元姿勢(位置を含む)、形状認識などの精度を表す。物体に装着したセンサを認識する手法は、古くから研究されてきた。広域における物体位置の認識には GPS が最も汎用性を持って活用されている。屋外での物体位置の認識において普及が進んでおり、Pokémon GO [24]のようなモバイル端末向け AR ゲームでも使用されているものの文献[25]によると、位置測定精度は数 m 程度であり、対象物体がこの測定精度に比して十分に遠距離にあるという状況でないと物体と CG の幾何学整合性をとることが重要視される応用領域に用いることは難しいとされている。

今後も精度の向上がなされ、用途に応じて使用されて行くとみられるが、MR において人が直接インタラクションする物体の位置や形状などを認識するシステムに対しては、GPS による位置計測は不向きな手法といえる。

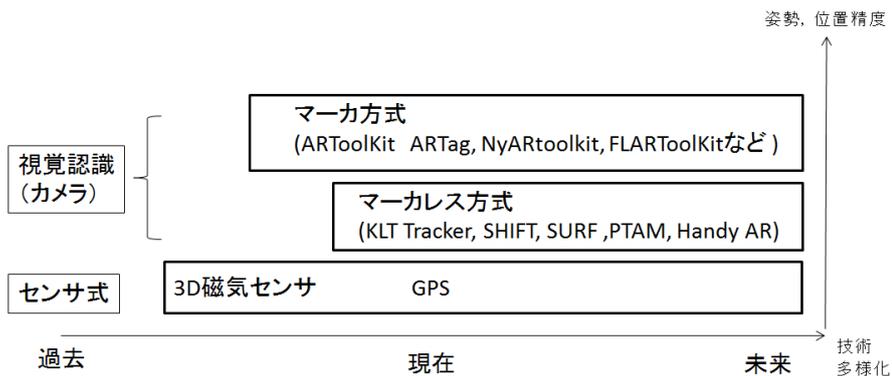


図 2.1-1 物体認識技術の進歩

文献[25]によると3次元磁気センサ方式は、1994年に完成したシステムとして3次元姿勢推定における6軸自由度を一度に推定できること、またカメラのフレームレートよりも高速で計測できる点で優れていると記述されている。それゆえ、MR領域での研究開発に用いられることが多かったが、環境の磁界変化に弱い点や専用システムであるため導入費用も安価とは言い難いという欠点がある。Canonが磁界センサを活用したMR Platformシステム[26][27]を提供しているがビジネス向けの大がかりなシステムでの適用にとどまっている。

MR用途において人間が見ているHMD上の映像に対して、どのようにバーチャル物体のレンダリング結果を重畳表示させるかという課題がある。従来のCGコンテンツを体験するだけのVRシステムであれば、人間の存在する実世界と物体との位置関係は問題にならなかったが、実体物とのインタラクションをとまなう場合VRであっても実世界とバーチャル世界の同調・整合が必要となる。

文献[6]によると、下記3つの課題に分類されている。

- 幾何学整合性
- 光学的整合性
- 時間的整合性

幾何学整合性とは、実世界とバーチャル世界の3次元的位置合わせを意味しており、実世界の意図した位置にバーチャル物体が存在するような映像を作り出すことである。2つめの光学的整合性は、実体物とバーチャル物体の陰影や画質の整合性を取り扱った問題である。最後の時間的整合性は、実世界とバーチャル世界を合成した際、時間的な遅延や同期ずれがないことを意味する。

MR で必要とされる光学的整合性は、実体物とバーチャル物体の陰影など写実性の整合に関する技術課題であり実体物とのインタラクションとは別の課題であるため本研究では対象外とする。時間的整合性は、コンピュータの処理速度などに依存することが支配的とみられ、昨今ではスマートフォンのようなモバイルデバイスの計算力向上に飛躍的進歩により完全性が高まりつつあるため、コンピュータの計算能力は対象外とする。

VOIT 実現を目的とすると、上記の中で CV が解決すべき重要課題は幾何学整合性であり様々な研究がなされてきた。CV の完全性を高めて幾何学的整合を実現するための技術は、主にマーカをカメラで撮像する方式とマーカレス方式 に分類できる。

図 2.1-1 の過去の技術に位置付けるもので、最も有名なものに FasTrak[28][29]に代表される 3 次元磁気センサの活用からはじまったが、1990 年代後半からは、イメージセンサの技術進歩にともない CV を用いた方式が位置合わせ技術の主流になった。

暦本の先駆的な研究[30]では、2次元マーカを活用しマーカとカメラの幾何学的位置・姿勢関係の推定がなされた。その後、暦本の手法を応用して開発された ARToolkit, 図[2.1-2]の公開により、当該分野の研究が飛躍的に加速するきっかけとなり現在でも ARToolkit は幅広く活用されている。その後、ARToolkit を改良して様々な研究がなされ、ARTag[31][32], NyARToolkit[33][34] FLARToolkit[35][36]などが考案されたためカメラによるマーカ認識の完全性が高められてきたが、これらは全て正方形の黒い枠とその中の白黒ドットで表現される ID 部分で構成される 2次元コードで構成され、2次元平面に装着することを想定したマーカ方式である。

マーカが物体に装着された場合、CVにより物体の3次元姿勢推定を行うことが可能であり、IDが存在するのでカメラが特定物体の属性を理解することできる観点で優位性がある。マーカの存在自体が人の目で確認できるため、そこにバーチャル物体の存在を認識することが可能になるという利点に対し、白黒正方マーカの存在が実体物に装着された場合、美観を損ねる欠点という相反する問題が発生する。また、正方マ

一カ所の動的歪曲やボリューム曲面へ適用は困難であり正方マーカが AR ゲーム用カードなどに装着された場合、裏表をシームレスに視覚認識することができないという認識方向の不完全性という問題が残る。

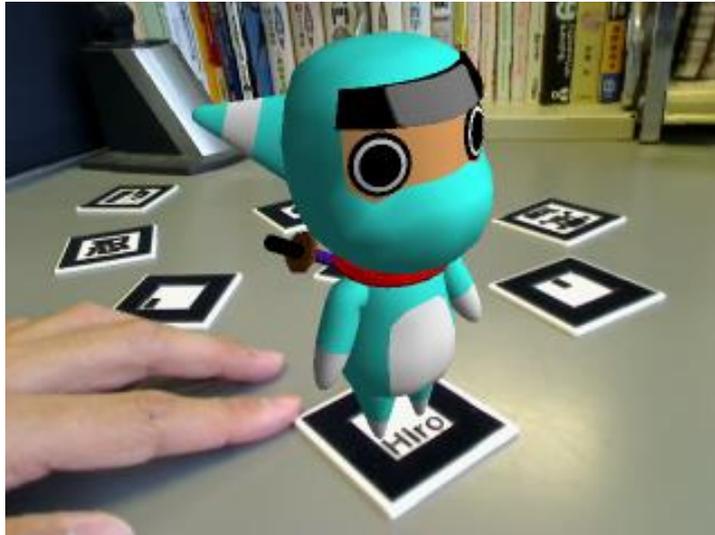


図 2.1-2 ARToolKit

ゲームなどにおいて高速アクションをとまなう人や物体を CV で認識する際、汎用カメラに使用される CMOS イメージセンサの特性に起因するローリングシャッタ歪みの問題が存在する。一般的に、MR における時間的整合とは、たとえば、HMD で体験者が高速で首を動かしたときヘッドトラッキングの遅延により HMD に表示される映像と首の動作が整合しないようなことを意味する場合が多いが、ローリングシャッタ歪みは、カメラ内部で生じる問題であるが高速で物体を認識する際に発生する。ローリングシャッタ歪みの影響で撮像した従来方式のマーカ画像に歪みが生じるとマーカの CV 認識が破綻し継続できない問題は時間軸にも起因するが、意味が異なるため本研究では時間的整合は対象外の課題とする。

これまでに述べてきた専用マーカ以外にも、データタグを使用した方式として QR コード[37][38]は、現在最も普及しているデータタグで工場での検査工程や広告配信等で広く利用されており、2次元マーカとしても使用可能である。QR コードは、目印である隅3点のコーナーパターンを検出するために、カメラとマーカの距離が近く、比較的正面から撮影する必要がある。つまり QR コードとカメラの距離が離れている場合マーカの検出そのものが難しい。QR コードの認識のために、符号化開口[39]や

超解像[40]技術を利用して検出性能を改善する試みもなされているが、1cm 四方のマーカを 1~3m の距離から検出するのは困難である。ARToolKit などマーカ専用の方式に比べて、データ格納領域が大きい点や、エラー訂正の仕組みによる誤読耐性などの優位性がある。マーカの物理的歪みや美観を損ねるといった問題は ARToolKit などと同様に発生する。

マーカを使用しない方式としてテクスチャをマーカの代わりに使用するマーカレス方式が近年盛んに研究されている。コンピュータの計算力高速化にともない、もともと実世界に存在する特徴点を利用する方式である。一般的なマーカレス方式の利点として実体物にマーカを装着する必要がないことからコスト面での優位性があり、マーカにより美観を損ねることがないこと、また実世界に手を加える必要がないことも優位性といえる。図 2.1-3 に示す KLT Tracker[41][42]など自然特徴点を画像から抽出する手法は古くから研究されてきた。

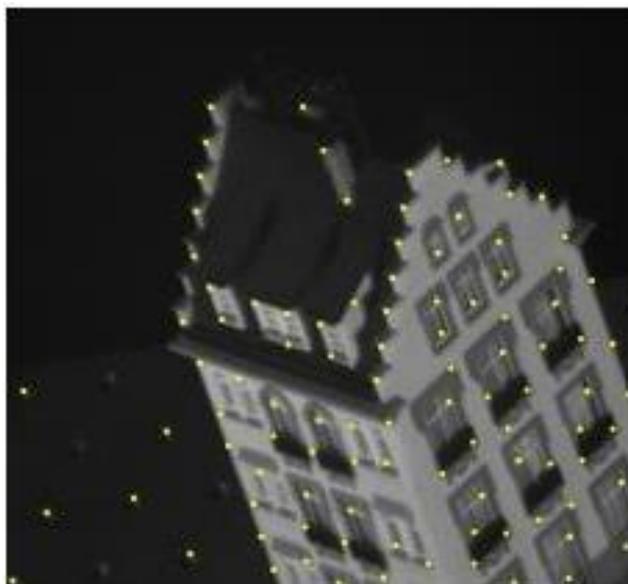


図 2.1-3 KLT Tracker のよる特徴点抽出 [41]

動体のフレーム間で照明の変化に認識が追従しづらく頑健性にかける問題があったが、それを解決した現在の技術に示した代表的なものに Lowe によって提案された SIFT (Scale Invariant Feature Transform) アルゴリズム[43][44]や、それを拡張した SURF (Speed Up Robust Features) [45][46][47][48]アルゴリズムのように、フレー

ム間での回転やスケール変化に対しても安定して特徴点の追跡を可能にしたものが実用化された。さらに、近年注目を集める方式として Klein らの PTAM (Parallel Tracking and Mapping)[49][50][51][52][53] (図[2.1-4]) と呼ばれる方式があり、複数枚の画像フレームの変化とともに、フレーム間の特徴点を追跡し物体とカメラの位置関係を推定する。

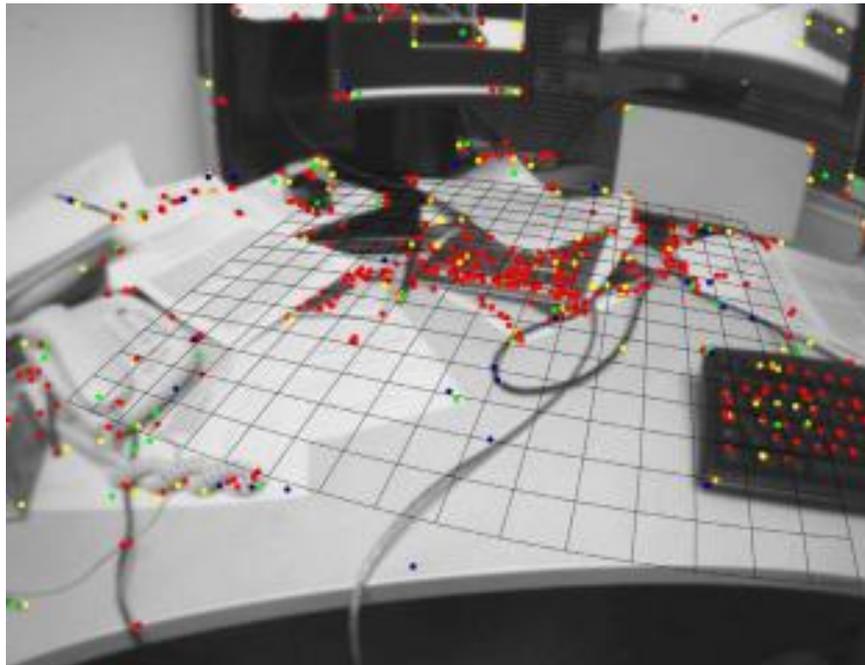


図 2.1-4 PTAM による点群抽出 [49]

PTAM が利用している点群特徴抽出アルゴリズムは、FAST (Features from Accelerated Segment Test) [54] と呼ばれるコーナー特徴を検出する方式で、ある程度コントラストの高いテクスチャの物体が、雑然とシーン中に 3 次元的に広がっている状況が認識に対して有効である。一方で同じテクスチャが繰り返されるような面や物体が存在するシーンを避けなければならない点で認識に関して制限が生じやすいという問題がある。マーカレス方式の CV 認識に共通する問題として、自然特徴点がある程度都合よく存在しないと安定した認識ができないことや、まったく同じ形状の特定物体を区別することは不可能である点があげられる。マーカレス方式として開発された Handy AR[55][56]、図[2.1-5]では、手のひらの部分の肌色検出から指先のエッジから特徴点を抽出することで手の位置・姿勢を推定している。Handy AR は人が自分

の手を用いて直観的にバーチャル物体を実世界の空間上に配置することを可能にした。しかし、肌色検出は光の影響を受けやすいという欠点がある。また、特定物体として誰の手かを区別することが困難という問題もある。



図 2.1-5 Handy AR [55]

MR で必要とされる幾何的整合性を実現するための CV 技術には、マーカ式、マーカレス方式が存在するが利用目的において適当な方式を使い分けることが重要といえる。しかしながら、どちらの方式も未だ完全性が確立されたとは考えられない。マーカ式においてはマーカが装着された物体、マーカレス方式において対象物体が動的に変形・歪曲したような場合に認識が破綻しやすいのは共通の問題である。どちらの方式も実環境における物体が剛性を保っており、物体の位置や姿勢に基づき認識される結果が動的な物体の形状変化に影響を受けないことを前提としているためである。

マーカやデータタグは通常、白黒のドットと黒い枠の正方形で構成されると前述したが、色の位置や配列順序など認識する方式も存在する。かつてカメラはマシンビジョンや放送用など特殊な領域で使用されてきたが、昨今ではスマートフォン、ラップトップ PC などの汎用デバイスにカラーカメラが搭載されており、デバイス内に存在する色情報を活用し価値を創出しようと試みるのは自然な流れと考えられる。色情報をコンピュータビジョンに活用するモチベーションは様々な側面があるが、その1つが、マーカまたはデータタグ内に格納または ID として使用される情報量の増大である。

カメレオンコード [57][58]と呼ばれるカラーコード(データタグ)は、図[2.1-6]のように 3×9 個のビットセルを 3 色で表現するコード体系である。各セルは黒地の無彩

色に配列されセルどうしを分離している。コードの周りにファインダと呼ばれる黒い枠が存在し、ファインダを基準として各セル色の位置を認識しながらコードを読み取る方式である。この方式では3の27乗通りの数値表現が可能であり、白黒より表現するデータ量を大きくできる特徴がある。QRコードをカラー化したようなコード体系であり、物流での商品タグやカタログ紙面上での読み取りタグや一部ARマーカ用として商用化されている。データタグの一種であるため、エラー訂正対策がなされており、誤読耐性は高い。ファインダが基準として視覚認識されるため、ファインダやコード全体が歪むと認識不可能になる。

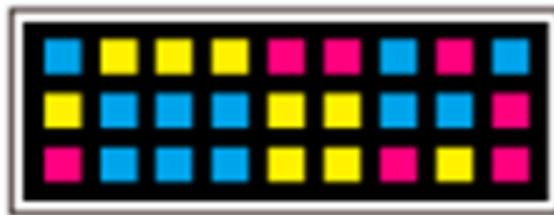


図 2.1-6 カメレオンコード [57]

また、副次的効果としてカラー化されることにより白黒ビット列で構成されるQRコードに比べると見た目の無機質さが比較的 low、かつ目立たせやすいとも考えられる。ただし、形状は長方形に限定されるため変形をともしない形状自由度はない。

文献[59]では、画像ボケにロバストなQRコードに代わるマーカについて論述している。この手法ではSIFT方式を活用してマーカの大きさが対称に変化しても頑強な認識を可能とする手法を提案しており、色情報の活用が視覚認識の頑強性を高めることを論じている。カメラによる視覚認識は、レンズのフォーカスに起因するボケなどが認識に影響することがありボケの対策は重要課題である。オートフォーカス式のカメラが完全にフォーカスするまでマーカ認識を待つ必要があるとき認識に遅延が発生し時間的整合性に影響する可能性がある。

1次元データタグの代表的なものとしてバーコード[60][61] 図[2.1-7] は産業界で幅広く使用されている、バーコードでは白黒パターンの位置情報を検出する方式でコード情報をCVで読み取るが、色情報を活用した1次元データタグとしてカラービット(CB)と呼ばれる方式が存在する(図[2.1-8])。

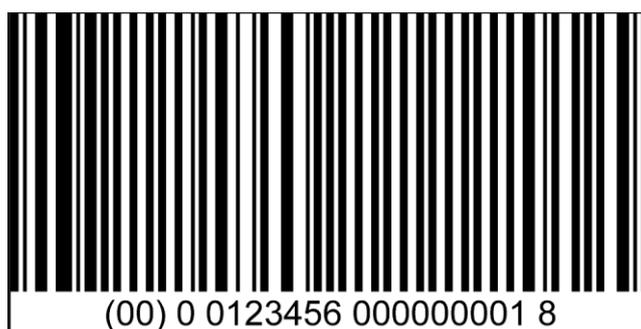


図 2.1-7 1次元バーコード

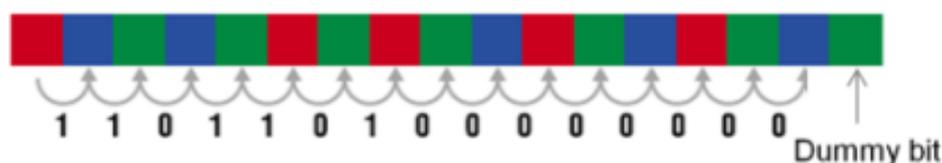


図 2.1-8 1次元データタグ カラービット [20]

他のデータタグやマーカが、ファインダと呼ばれるマーカの周辺に設置される枠などの位置を基準にビット情報を CV 認識で読み取っていくのに対し、カラービットは位置や形状に依存せずビット情報を読み取るため形状が静的または動的に変形したとしてもビット情報を読み取れる方式である。図[2.1-8]に示すようにカラービットは赤青緑のセルと呼ばれる彩色されたビット列で構成される。色遷移を順番に読み取る形式でビット列を構成するため、細長く無限にビット列を連結することが可能である。色情報の順序だけでタグが形成されるため多少の画像ボケに対して頑強である。図[2.1-9]のようにイラストなどに溶け込ませてコード情報を埋め込むことも可能であるため、美観を重視する用途などに実用化されている。無機質な QR コードが視覚的に受け入れがたいファッション誌や、細長い形状を利用して大量のファイルの検索性タグ(図[2.1-10])として、また図書館で本の管理などに実際に活用されている。大量のファイルにカラービットを装着して、タブレット PC やスマートフォンのカメラで複数タグを同時に視覚認識し、所望のファイルを高速検索できるシステムとして実用化されている。2次元コードに比べると細長い形状を有するため、ファイルやカードなどの検索性や管理に有用性のあるデータタグである。しかしながら、カラービットは1次

元コード体系であるため，3次元姿勢推定は不可能であり2次元マーカとして動作するわけではない。

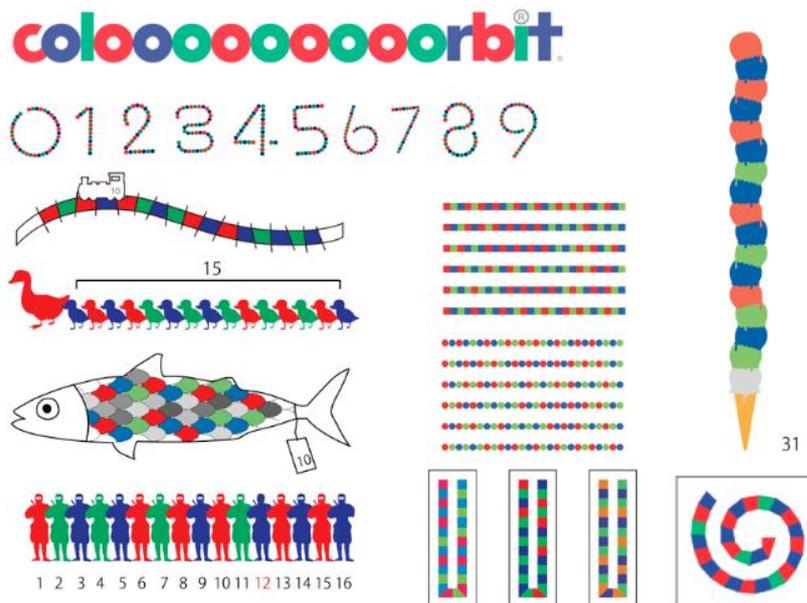


図 2.1-9 カラービットのデザイン自由度 [20]

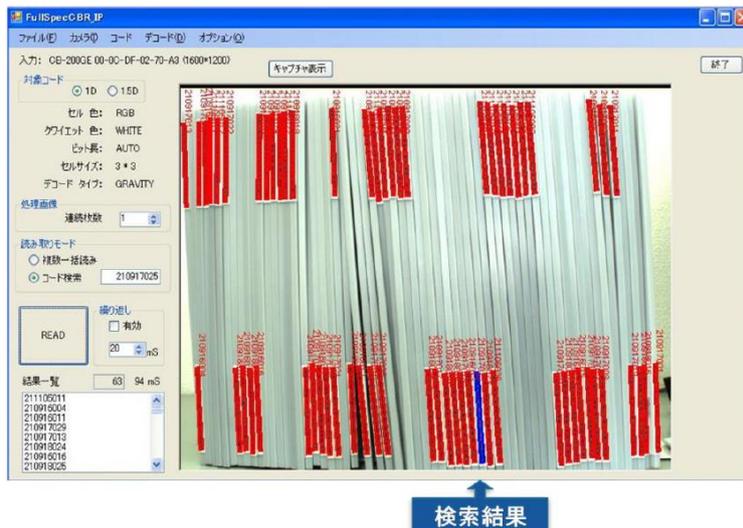


図 2.1-10 カラービットを使用した，ファイル検索システム [20]

ここまで、各種マーカ方式、マーカレス方式と CV 技術について述べてきた。VOIT を実現する前提において、実世界での物体を視覚認識する際の完全性についてまとめてみたい。以下の要件が満たされて物体が継続認識されることで VOIT に必要な CV の完全性が満たされる。

1. 高精度な 3 次元姿勢推定
2. 特定物体が区別できること
3. 対象物体の形状自由度が高いこと
4. 高速認識性
5. 視覚認識の方向自由度が高いこと
6. 背景環境依存性が低いこと

上記、完全性を満たすための要件と各視覚認識方式の比較表を表[2.1-1]に示す。

◎ > ○ > △ > × の順序で完全性の高さを示すものとする。

表 2.1-1 視覚認識方式と要件

要件	方式	4象限マトリクス との対応	ビジョンマーカ式				マーカレス方式		
			カラービット (1次元データタグ)	カメレオンコード (2次元データタグ)	QRコード (2次元データタグ)	ARToolKit (2次元マーカ)	SHIFT	PTAM	Handy AR
3次元姿勢推定		3	×	△	○	◎	○	○	○
特定物体の区別		3	◎	◎	◎	○	×	×	×
形状自由度性		1, 3	◎	×	×	×	◎	◎	◎
動的歪み耐性		1, 2	◎	×	×	×	×	×	×
認識方向自由度		4	△	×	×	△	◎	◎	◎
背景環境依存性		3	○	○	○	○	△	△	△

上記要件 1 の「高精度な 3 次元姿勢推定」は対象物体とカメラの位置関係をコンピュータが理解し、幾何学的整合をとりながらバーチャル世界に CG 表現するために必要な要素技術であり、AR マーカ技術である ARToolKit がもっとも優れている。この要件は、図[1.2-1]の 4 象限マトリクスチャートにおける 3 象限の「基礎実験」で必要とされる技術要素とする。

上記要件 2 の「特定物体が区別できること」に関してマーカレス方式の場合、まったく同じ形状や色の複数物体を CV で区別することは不可能であるがマーカ方式であ

れば、マーカ個体ごとに異なる ID 情報の付加が可能であるため特定物体を区別して認識することが可能である。また、複数同時に物体を認識するときでも問題なく物体を区別して認識できるとともに、ID に紐づけして物体の属性情報をコンピュータが理解することを可能とする。図[1.2-1]の 4 象限マトリクスチャートにおける 3 象限の「基礎実験」で必要とされる技術要素とする。

上記要件 3 の「対象物体の形状自由度が高いこと」に関して、実世界には ARTookKit など平面マーカ方式が対象とする物体平面以外に様々な形状の物体が存在する。そのため、マーカ式の場合、3 次元形状物体への対応を考慮したマーカの形状自由度性が求められる。一方、マーカレス方式の場合、特徴点検出の観点から複雑な形状の方が認識の完全性が高い傾向にあり、形状自由度性は十分に高いと考えられる。図[1.2-1]の 4 象限マトリクスチャートにおける 3 象限の「基礎実験」と 1 象限の「視覚と力覚の整合」で必要とされる技術要素とする。

上記要件 4 の「動的歪み耐性」は柔軟物形状の動的変化への対応および、剛体であっても実体物が高速で動いたときカメラのイメージセンサ起因の画像歪み発生問題への対応性を意味する。マーカ方式では形状自由度性を有するカラービットの優位性が高い。マーカレス方式の場合、柔軟物が動的に形状変化したとき CV による認識を継続することは困難とみられる。図[1.2-1]の 4 象限マトリクスチャートにおける 1 象限の「視覚と力覚の整合」と 4 象限の「高速動体対応」で必要とされる技術要素とする。

上記要件 5 の「視覚認識の方向自由度が高いこと」は、実体物の CV 認識において、あらゆる方向からの認識自由度の高さを意味する。方向性に関してマーカレス方式の場合、方向依存性がなく自由度が高い点で優位性がある。マーカ方式の場合 ARToolKit による 2 次元平面上でのマーカ認識では 360 度回転方向からシームレスに認識できないという問題がある。ARToolKit の場合 1 つのマーカで平面の表と裏に対して CV 認識の継続は不可能であり QR コードや他の 2 次元マーカ方式も同様の問題がある。図[1.2-1]の 4 象限マトリクスチャートにおける 2 象限の「幾何学的整合」で必要とされる技術要素とする。

上記要件 6 の「背景環境依存性が低いこと」は、CV により特定物体を認識する際に、背景環境の形状、色、距離情報と区別されることで姿勢推定の完全性が高いことを意味する。マーカレス方式の場合、特定物体の背景に同一形状、同一色の物体が存在するとき CV で特定物体だけを区別して認識することは不可能である。一方、デー

タタグやマーカ方式の場合、特定物体を区別することが可能な点で優位性がある。図[1.2-1]の4象限マトリクスチャートにおける2象限の「幾何学的整合」で必要とされる技術要素とする。

上記要件1から6の観点から、表[2.1-1]を参照するとき、要件に×が存在する方式はVOIT開発のための活用が難しいと考えられる。特定物体認識を目指すVOITではマーカ方式に優位性があり、マーカ方式の中においての選択となる。カラービット方式は1次元データタグであるため3次元姿勢推定が不可能である点において×が付く。QRコード、カメレオンコード、ARToolKitといった2次元データタグまたはマーカ方式の場合、形状自由度性に乏しく動的な特定物体の形状変化に対応できない。そこでカラービットの形状自由度性を利用して2次元化することで3次元姿勢推定を可能にする方法を検討した。2次元化したカラービット方式は、1から6の要件を満たすため本研究ではVOIT開発のためのCV用技術としてカラービット方式を採用する。なお2次元マーカ形状に変形させたカラービットの有用性に関しては、第3章にて実験を含めた評価を行う。

2.1.2 力覚提示技術の分析

MRにおいて実体物とのインタラクションする際、CVの完全性が高まり、実体物に相当するバーチャル映像をHMD上で高度に表現できるようになった場合、体験者の次の欲求としてバーチャル映像に触れてみたいと感じることが考えられる。触れてみたとき感触や反力が得られないとき違和感が発生するため、HMDの実用化にともなない視覚・聴覚の次に必要な技術として触覚をともなった実体物とのインタラクションが必要と考えられる。柔軟物を押し込むような動作を想定する場合、人が柔軟物を押し込む動作に対して反力を発生し、その値を推定しなければならない。そこでVOITでは柔軟物とのインタラクション状態をCVにより力覚推定をおこない、力覚度合いに相当する数値をコンピュータにフィードバックを行う技術が必要であることから、下記に従来の力覚提示・推定技術について分析する。

人とコンピュータとのインタフェースとしては、図[2.1-11]に示すようにマウス、キーボードといった機械的なものが古くから活用されてきた。また、近年ではスマートフォンのタッチパネル、コンソールゲーム機のコントローラなどは振動をコンピュータにフィードバックすることで疑似的なインタラクション感覚を人にもたらしめた。これらは、操作したときに触覚が発生するため、人間という存在を意識しなければ、ある程度、直観的な物理的インタラクションを人間とコンピュータにもたらしめてきたと

いえる。しかしながら、MRの世界では1人称の人間と、周囲環境との関係性、整合性が必要なため新たなインタフェース方式が必要と考えられる。周囲環境の整合性という観点からは、実体物とのインタラクションの重要性があげられ、そこで必要な技術の1つが触覚提示である。VOITでは触覚の1部の感覚とされる力覚のみに着目し物体の表層で発生する触覚は対象外とするが、技術分類としては触覚を含めて分析を行う。

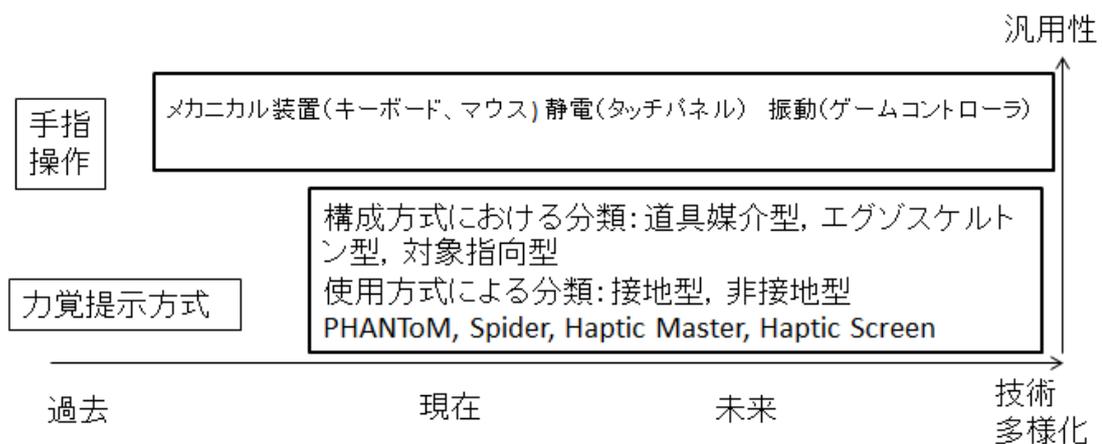


図 2.1-11 物体とコンピュータのインタラクション技術

文献[62]では五感とコンピュータとのインタフェースについて詳述されており、文献によると、五感の中における触覚は感覚受容器が身体中に配置されており特別な位置で感じる感覚ではないと述べられている。また、他の感覚に比べて、インタラクティブ性が強いという特徴を持つ。たとえば手を伸ばして実世界の対象物に触れることで初めて触覚が発生する。大脳における各感覚に特化した部分の割合を見たとき、触覚は視覚に劣らないほどの体積を占めると言われている。文献[63]によると、人間の感覚は日常的には五感と呼ばれるが、学術的には以下のように分類されるのが一般的とされている。

- 1) 特殊感覚(視覚・聴覚・味覚・嗅覚・前庭感覚(平衡感覚))
- 2) 皮膚感覚(触圧覚・温覚・冷覚・痛覚)
- 3) 深部感覚(運動覚・位置覚・深部圧覚・深部痛覚)
- 4) 内臓感覚(有機感覚(空腹感,はきけ等)・内臓痛)

これらのうち皮膚感覚と深部感覚を合わせたものを体性感覚と呼び、バーチャル世界とインタラクションをするときの触覚とは上記の皮膚感覚と深部感覚に対する刺激を合成することを意味するとされている。皮膚感覚のみの刺激を与えるものはタクトイル提示と分類され、狭義の触覚提示はこちらを意味する。一方、深部感覚に刺激を与えるものは力覚提示と呼ばれる。さらに深部感覚に深部圧覚と呼ばれる感覚があり、物を押したり引いたりするときの抵抗覚と、物を持つときの重力によって生ずる重量覚がある。本研究では深部圧覚における実体物を押したり引いたりするときの抵抗覚に着目し、これを数値化する技術を力覚提示と定義するものとする。MRにおいて手や指のジェスチャにともない実体物に対する反力を発生させるような場合、力覚提示が必要となり提示された情報をコンピュータにフィードバックすることが必要である。

力覚提示技術は1990年代中盤から実用化されはじめ、有名なものの1つにPHANToM[64][65][66] 図[2.1-12]があげられる。PHANToMは、作業空間の中で指先に3軸のカベクトルを与えるものでデスクトップ使用を想定した比較的大がかりな仕組みであった。1994年には、岩田らがHapticMaster[67][68]と呼ばれるデスクトップ力覚提示装置を開発し6軸自由度の提示を可能にした。

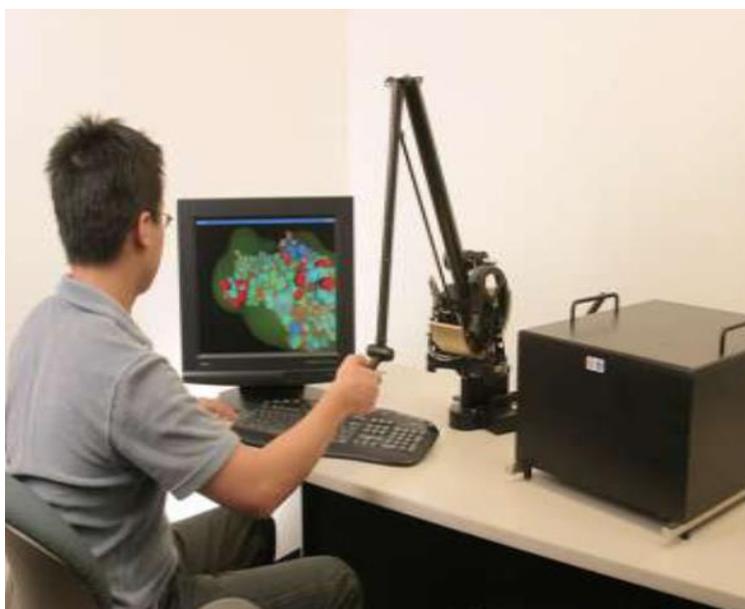


図 2.1-12 PHANToM [66]



図 2.1-13 Haptic Master [67]

文献[69]で、青木らは力覚提示を大きく接地型、非接地型に分類している。接地型ではデバイスが壁や床、机などの環境に設置や固定された状態で体験者に反力を与える。そのため正確で大きな反力にともなう力覚を提示することができる。しかし、実世界で体験者が移動する場合、装置を利用する空間を限定することはできない。そのため接地型力覚提示方式では、利用が想定されるすべての空間に力覚提示装置を配置する必要があり高コストである。一方、非接地型では力覚提示装置を外部（壁や地面）に固定しない状態で体験者に反力を与える。提示装置を固定する必要がないことから、利用する場所を選ぶことなくどこでも使用することができる。しかしながら装着型力覚提示では、着脱の手間や装置の重量に関して問題点を抱えている。装置の重量が大きい場合、体験の際に利用者に疲労感や違和感を与えてしまう。装着型デバイスでは装着していることが気になってしまうという問題点があった。

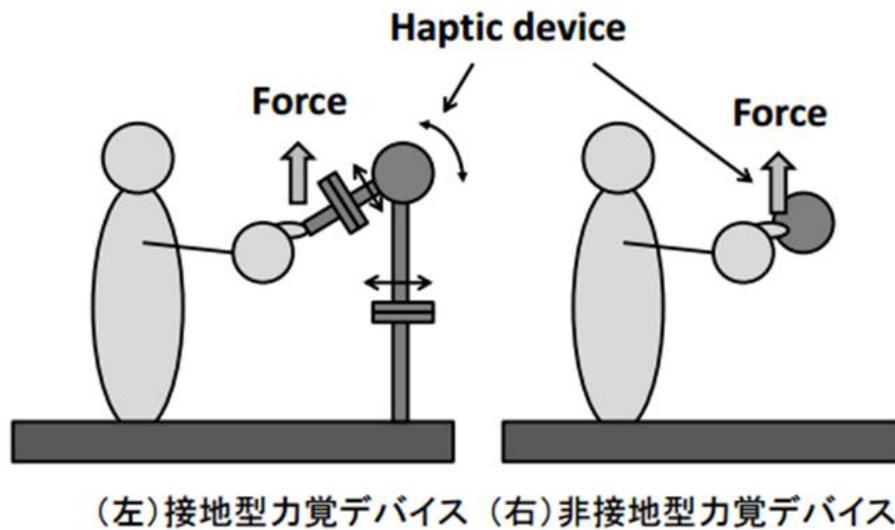


図 2.1-14 接地型と非接地型の力覚提示 [67]

文献[67]で岩田は、力覚提示の構成方式として下記 1) から 3) の方式に分類している。

- 1) 道具媒介型方式とは、ペンやボールなどの把持部を媒介にして力覚提示を行う。VR に応用されたものとして代表的なものは SPIDAR[70][71][72]図 [2.1-15]が良く知られている。人が接触する部分に糸を用いるため軽量に作れる一方、糸は推力を発生できないためサイズが大きくなり、接地型であるためモバイル用途には不向きな方式である。

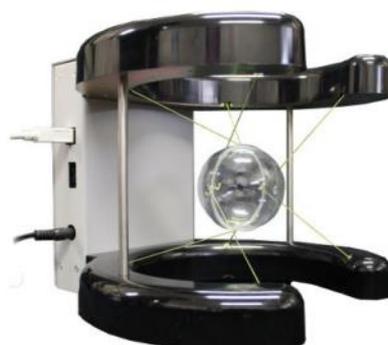


図 2.1-15 SPIDAR-G [72]

- 2) エグゾスケルトン（外骨格）型とは、人の体、腕、手や指に装着する形態にてアクチュエータ付きの機構を持って、たとえば、各指に独立の力を提示しながらバーチャル物体を掴んだり押ししたりする感触の提示が可能である。文献[73]図[2.1-16]では、人の作業感覚を力覚フィードバックすることができる人間装着型インタフェースが提案されている。ウェアラブル装置であり非接地型に分類されるが、この方式は装置が大がかりであり着脱が容易でないためストレスを感じやすく家庭用やモバイル用途に向いているとはいえない。

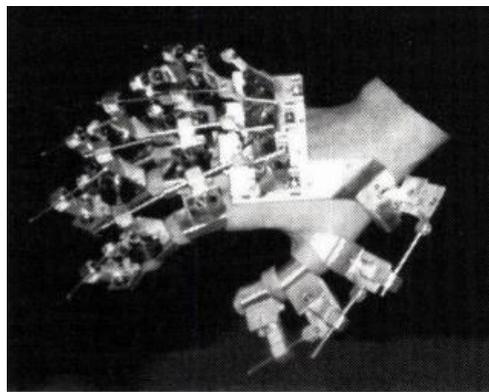


図 2.1-16 Sensor Glove II [73]

- 3) 対象指向型とはインタフェースデバイス自体が変形や移動することで、バーチャル物体の形状を模擬する方式である。体に装着物がないので人体へのストレスが低いという優位性が考えられる。

文献[74]では、対象指向型に分類される Haptic Screen 方式が提案されている。映像ディスプレイの下部にセンサと直動アクチュエータが取り付けられた方式で、映像に直接触れる感覚が得られる点を特徴とするが、大がかりな装置が必要で接地型に分類されるため、モバイルや家庭用途に活用するのは難しいとみられる。



図 2.1-17 Haptic Screen [74]

文献[75]では、シリコンの柔軟シートを用いた触覚提示方式が提案されており、VRシステムにて、医師が患者の身体や患部といった柔らかい物質で、形状、弾性などの感触をシステムにフィードバックすることを目的としている。対象指向型に分類される本方式ではシート両サイドに配置されたアクチュエータがシートを引っ張る方向にバイアス張力を加え続け、指をシートに押し込むときの、めり込み感により柔軟物を押すことに近い感触が提示可能な点で優位性がある。しかしながらアクチュエータなど大がかりな仕組みが必要であり、接地型であるため可搬性も考慮されておらずモバイル性を考慮したコンシューマ装置として実現するのは難しいとみられる。

2.2 まとめ

実世界とのインタラクションとバーチャル世界の同調による視覚と力覚の整合を実現するための VOIT に関連する従来技術に関して CV 技術と力覚提示・推定技術に分けて詳細分析を行った。図[1.2-1]にて技術要件を表す 4 象限マトリクスチャートの各要件を満たす観点において技術分野の分析を行った。CV 技術においては、2, 3, 4 象限における技術要件を満たす観点からカラービットを 2 次元マーカ化する方式を採用する。さらに 3 次元形状を有する柔軟物の状況を CV 認識することで 1 象限の VOIT 手法の開発が可能になると考えた。また、力覚提示技術の分析では様々な方式が研究されてきたがコンシューマグレードの装置を使って家庭やモバイル環境での使用を条件とする場合、柔軟物に対する力覚提示を行うことが困難であると分析された。そこ

で、これまで CV とは直接結びつかなかった力覚に関しても、CV 技術を活用して力覚推定を行うために、形状自由度特性を有するカラービットを活用した 2 次元マーカを採用して VOIT 開発に向けて、3 章以降の研究を進める。本章では力覚提示技術の分析を行ったが、VOIT では反力を発生させながら力覚をセンシングするための PFS を活用し、CV 認識を含めて力覚推定を行う。本研究の方式では PFS 自体が力覚の絶対値を提示するわけではないので、PFS 自体を力覚提示装置とは区別して力覚センサと位置付けるものとする。

第3章 基礎実験

本章では VOIT 実現に向けて、形状自由度特性を有する 1 次元データタグであるカラービットの 2 次元マーカ化を行い、物体の 3 次元姿勢推定に活用できる機能・性能を有するか否かを確認するための基礎実験と実用性評価を行う。また、VOIT では物体の歪みを認識する必要があるためマーカの形状変化の認識が可能であることを確認する。同時にカラービット方式の特徴についての説明を行う。技術要件マトリクスチャート[3.1-1]において、3 象限に「基礎実験」として分類する。（図[1.2-1]における本章で解決する技術要件部分を太字かつ赤枠で示す）

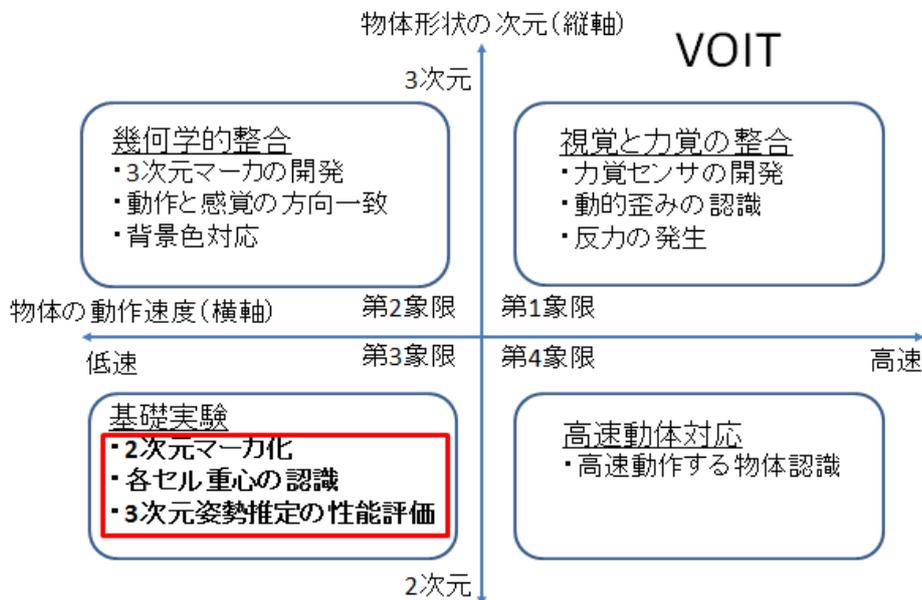


図 3.1-1 3 章における技術要件マトリクスチャート

3.1 カラービット方式について

カラービット(CB)は、木村によって発明された 1 次元データタグ方式でありビーコア株式会社によって実用化されている技術である。2 章の 表[2.2-1]にて視覚認識方式を分類したが、3 次元姿勢推定が不可能な点を除いて、カラービット方式は、本研究で必要とする要件を満たしている。検討の結果、形状自由度特性を利用して 2 次元化すると、3 次元姿勢推定を可能とするマーカとして活用できる観点からカラービット方式を採用した。他マーカ方式にはみられない動的歪み耐性という特徴が特定物体を認識する観点から対象となる実体物の選択肢拡大に貢献できる。

図[3.1-2]の(A)は、赤、緑、青色、それぞれのピクセルの集合（セルと呼ぶ）を連結した図形であり、セルの形状には特別な意味を持たないものとする。このとき、左端の赤セルの隣に青セルがあったとき、つまり、セル色が赤から青に遷移した状態を“1”と定義する。

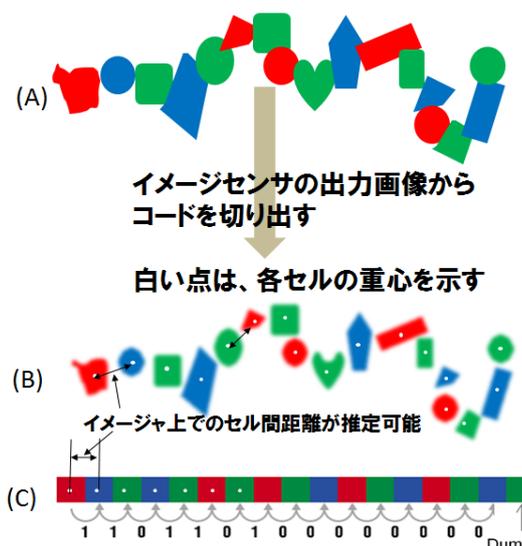


図 3.1-2 カラービットの仕組み

同様に左端から2番目の青セルから3番目の緑セルへ遷移した状態を“1”と定義する。3番目の緑セルから4番目の青セルへ遷移した状態を“0”と定義する要領で、図[3.1-3]に示す6通りの遷移法則を定義され、先端セルから後端セルまで順次セル色を読み取っていく。イメージセンサ上からタグを切り出して認識する際、セルのエッジ部分の認識を意図せず、図[3.1-2] (B) のように各セルに含まれる同色の塊と推定されるセル重心のイメージセンサ上の2次元位置として認識する。図[3.1-2]において、図中の(A), (B), (C)ともに同じ数値コードが表現されるが各セルの位置関係が異なる。一方バーコードやQRコードでは、コード全体位置を認識してから、位置を基準にコードを読み取っていくが、CBでは色遷移が正しく表現されたときコードとして成立する。このため、コードに動的な歪みがあった場合でも元のコードの形状と歪み量によるセル位置の差を検出できるという特徴がある。バーコードやQRコードでは、形や位置が固定されていることが原則とされる点において読み取り方式がまったく異なる。

つまり、CBは形状に対して自由度を有すると同時に、動的にコード形状が歪んだ場合でもコード認識が可能な方式であり、動的歪み量の検出に活用することが可能と

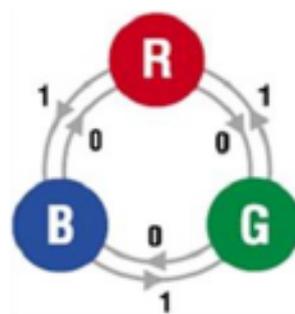


図 3.1-3 色遷移の法則 [20]

考えた。しかしながら、このような特徴が活かされている CB の実用例は現状で見当たらない。そこで、形状、歪曲自由度特性を利用しながら CB を 2 次元化することで 3 次元姿勢推定を可能とし、柔軟物への対応性を考慮して VOIT で活用するマークとして検討した。各セルの重心が、それぞれ認識されることでマークの歪み量の計測が可能とみられる。

図[3.1-2] (B)では、各セルの重心を白ドットで表現している。各セルのドットの位置関係を CV 認識することで、カメラのイメージセンサ上に展開されるピクセル位置の変化からマークの動的な変形状況をとらえることが可能となる。

CB をカメラ画像からコードとして切り出すとき、先頭セルと後端セルを区別する必要がある。そこで先頭セルは常に赤、後端セルは、緑または青で終了する。後端セルは先頭セルと区別する理由で、赤以外の色で終了するようにしたダミービットとする。総セル数 N に対して、 $2^{(N-2)}$ のコード値の表現が可能で 1 次元データタグであり、 N 数を増やせば無限にビット数を増やすことが可能である。ただしコードとして成立させるために以下の条件を満たす必要がある。

- セル列が途中で分岐してはならない。
- CB が交差してはならない。
- 一筆書きで赤青緑のセルが連結されていなければならない。
- コード周辺に周辺色と区別するために無彩色のクワイエットゾーンが必要。

上記の条件を満たす限り、コード形状に制限はない。最低 3 個のセルがあれば 1 か 0 の表現が可能であるが誤読を防止するために、エラー訂正用のビットをセルとして配置することが望ましい。クワイエットゾーンは、赤青緑の色情報を有するセルの周囲に無彩色の場所を設けて背景色と区別するために必要な領域を意味する。クワイエットゾーンがないと背景色との混色が発生し読み取りが不安定になるが、CB が使用される環境背景色が無彩色であればクワイエットゾーンとして扱うことも可能である。

本研究では、CB のビット列を表現するために赤青緑の 3 色を用いたが、必ずしもその必要はなく別の異なる 3 色を使っても良い。ただし、スマートフォンなどに内蔵される汎用カメラで使用される CMOS イメージセンサでは色分離の際の手法として原色カラーフィルタが採用されており、色分離を高いコントラストを持って行うに

は赤青緑が最適であると判断した。色の彩度，位相は色分離に影響するため図[3.1-4]に示す色相と彩度に関して，コードの色調整を行い再現性が得やすいように配慮する。

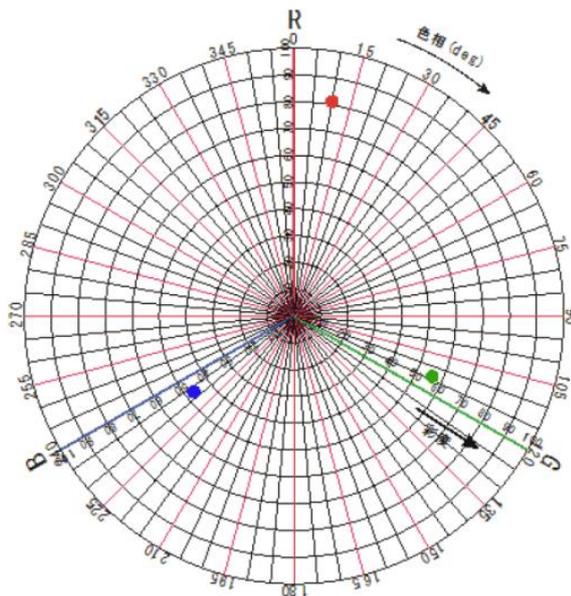


図 3.1-4 色彩の調整

CBについての解説を行ったが，1次元データタグであるCBでは3次元姿勢推定は不可能であり2次元マーカとして，そのまま使用することはできない。VOITでは3次元姿勢推定技術を必要とするため，CBを2次元化して基礎実験と実用性評価を行う。なお，CBの2次元化を行とき，2次元とはマーカとしての形状を意味しており，数値表現のためのコードとしては常に1次元である。

3.2 CBの2次元化によるL字型2次元マーカの開発

実体物の3次元姿勢推定を行うために，1次元データタグであるCBの形状を2次元化した。3次元姿勢推定を行うには，平面上で3点の位置が認識される必要がある。そこで，図[3.2-1]のように90度の角度を持ったL字型の形状に変形することでL字型2次元マーカを構成する。（以降，本章では「L字マーカ」と記す）

3次元空間において実体物に装着されたL字マーカが傾いてカメラで撮像されたとき，カメラの2次元イメージセンサ上に展開されるセル重心の位置変化よりマーカの回転，並進量を計算することで，実体物の3次元姿勢が推定できると考えられる。

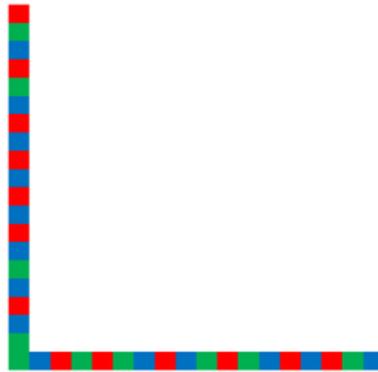


図 3.2-1 L字型に変形 (2次元化)

図[3.2-2]では、実世界における3次元空間の世界座標、L字マーカとカメラのイメージセンサ面の位置関係を示す。カメラのイメージセンサ表面と正対し、レンズの主点(Principal Point)とL字マーカの中心位置座標が一致するときの状態を世界座標(X, Y, Z)における回転 Rotation (0, 0, 0), 並進 Translation (0, 0, Lz)と定義する。Lzは、イメージセンサ表面からマーカまでの距離に相当する。

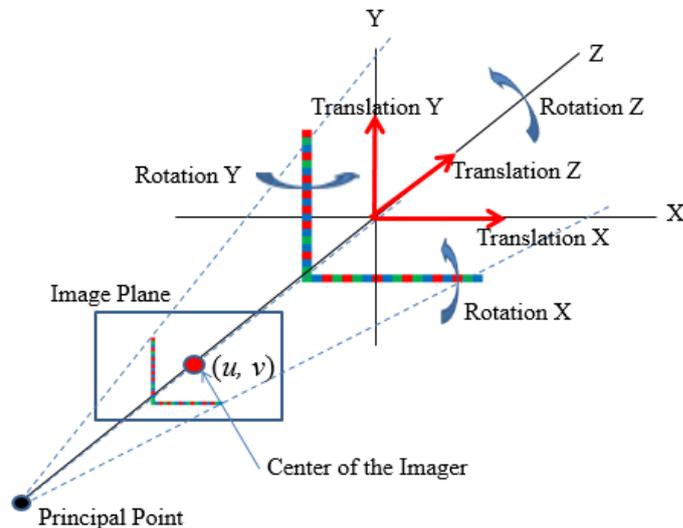


図 3.2-2 世界座標系におけるL字マーカとイメージセンサ面の関連

本章では、図[3.2-3]に示すL字マーカを設計した。各セルのサイズは $4 \times 4\text{mm}$ の正方形として、総セル数は36個に設定した。図の設計では2次元(2D)表面上にCB

を配置することを想定してセルサイズ, 世界座標系との位置関係, セル間距離を示し, カメラレンズの主点位置とイメージセンサの中心座標が一致するようにした.

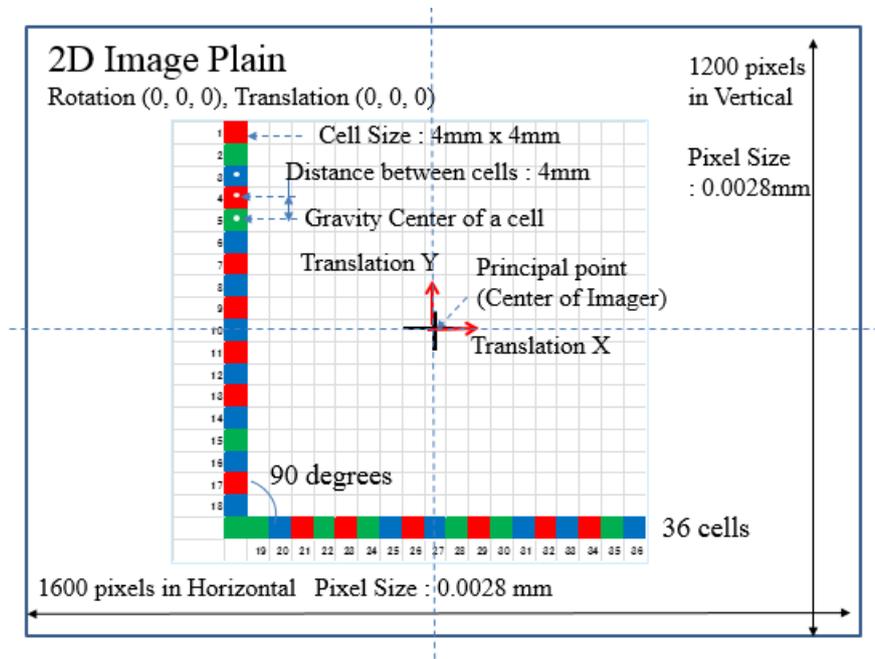


図 3.2-3 L字マーカの設計

3.3 L字マーカの3次元姿勢推定

本節では、カメラとマーカの幾何学的位置関係を測定するために必要な3次元姿勢推定について述べる。前節にて、2次元化して構成したL字マーカを利用する。図[3.3-1]にL字マーカをCV認識し3次元姿勢推定を行うフローチャートを示す。

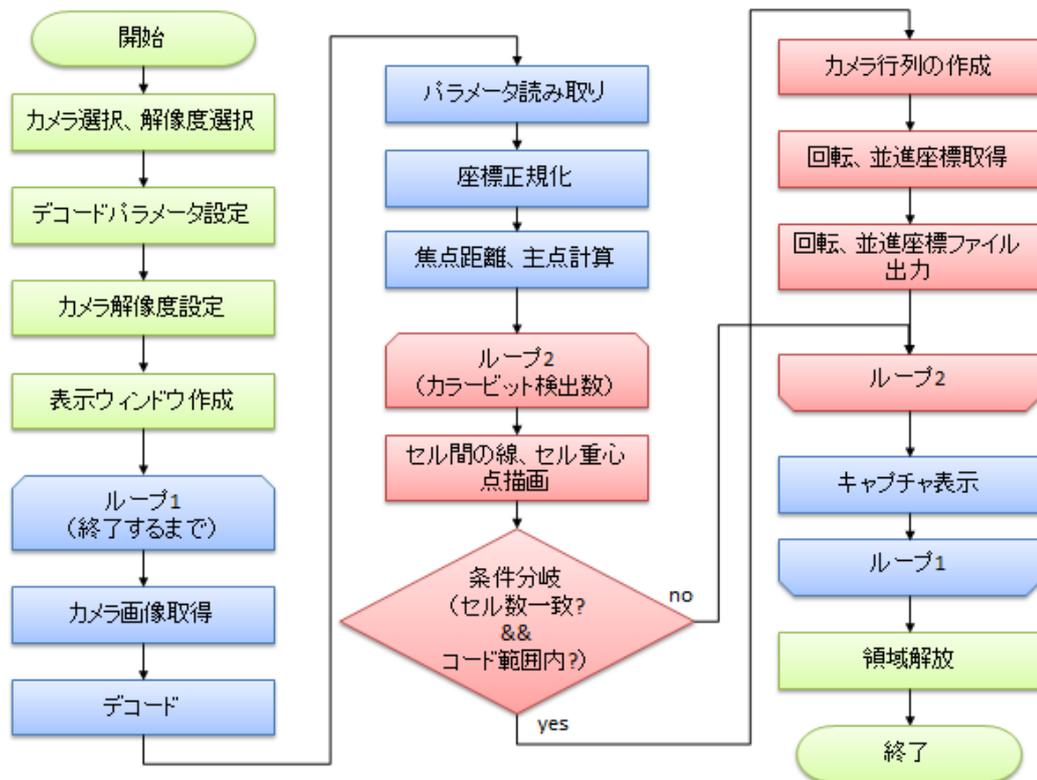


図 3.3-1 3次元姿勢推定のフローチャート

その後、カメラから画像を取得しカラービットを切り出してデコードを行う。このときのカラービット構造体は以下である。開始からカメラおよびデコード用のパラメータ設定を行う。

- ・ ID
- ・ セル数
- ・ カラービットの座標
- ・ 各セルの重心座標
- ・ セルの色

図[3.3-2]のピンホールカメラモデル[76]を用いて画角よりレンズの焦点距離(f_x, f_y)を求める。(単位ピクセル)

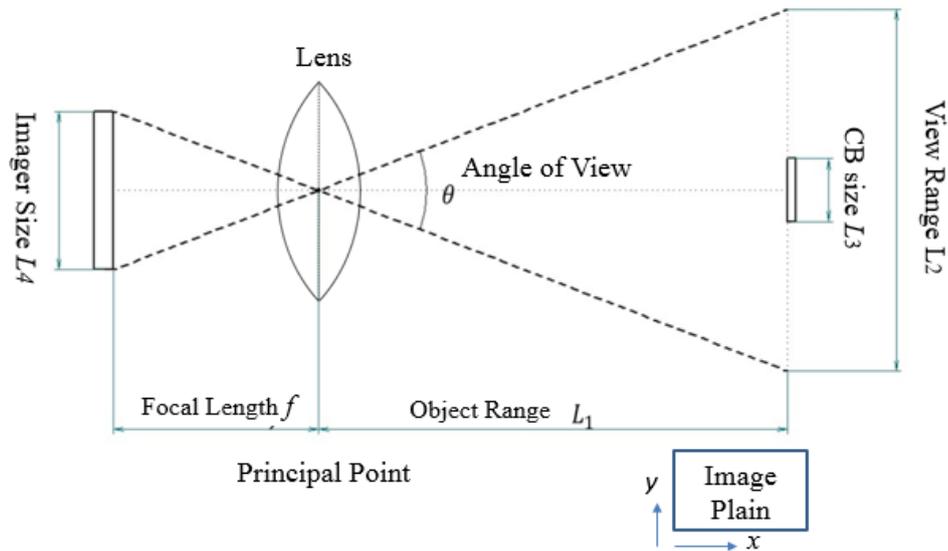


図 3.3-2 ピンホールカメラモデル

$$f_x = \frac{L_4 x}{2} \div \tan\left(\frac{\theta_x}{2}\right) \quad (1)$$

$$f_y = \frac{L_4 y}{2} \div \tan\left(\frac{\theta_y}{2}\right) \quad (2)$$

主点(C_x, C_y)がイメージセンサの中心座標と一致するとき, 数式 3, 4 が成立する(単位ピクセル)。

$$c_x = \frac{L_4 x}{2} \quad (3)$$

$$c_y = \frac{L_4 y}{2} \quad (4)$$

引き続き, セルサイズ, セル数を取得し, 焦点距離と主点の値から, 数式 5 に示すカメラマトリクス(CM)を構成する。

$$\text{CM} = \begin{bmatrix} f_x & 0 & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

3次元姿勢推定の計算には、OpenCV[77]を利用する。OpenCVで用意される関数 `cvFindExtrinsicCameraParams2` を使用してイメージセンサ上の2次元座標 $s(u, v)$ [単位：ピクセル] が数式6として表現される。

$$s \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x & 0 & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & t_1 \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & t_2 \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & t_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

数式6において X, Y, Z は図[3.2-2]の世界座標系におけるL字マーカの3次元座標を示す。 r_{11} から r_{33} は、回転行列、 t_1 から t_3 は並進ベクトルを示す。OpenCVでは誤差を最小化するために非線形最小二乗法で近似して出力値を求める。ここで、ロドリゲスの定理[80]を使ったOpenCVの関数 `cvRodrigues2` を用いて回転行列を回転ベクトルへ変換する。関数の内部ではロドリゲスの回転公式が使用される。任意の回転には回転軸が存在し、回転軸と回転角により回転行列を構成することができる。また、回転ベクトルは回転軸をベクトル方向で表し、回転量をベクトルの長さとして表す。最終的に、Rotation (X, Y, Z)は単位ラジアンで、Translation (X, Y, Z)は、単位mmでイメージセンサの中心からの変化量として求められるため、回転と並進値よりL字マーカの3次元姿勢推定が可能となる。

3.4 3次元姿勢推定の実験

本節では、前節で設計した L 字マーカの 3 次元姿勢推定のために実験系を構成し、ソフトウェア実装を行って精度の測定を行う。なお CB のデコードにはビーコア株式会社の 1D CB SDK (2012) [20]を使用した。

3.4.1 実験環境

図[3.4-1]に示すように、カメラ、レンズ、スケール付きスライディングレールと L 字マーカを回転させて物理角度が読み取れる実験環境を用意した。カメラレンズの画角は 35 度に設定、そのときの焦点距離は 7.1mm である。カメラから L 字マーカまでの距離はスライディングレール上のスケールで計測を可能とした。

カメラは、Microvision 社の VC-4302 を使用し USB2.0 経由で PC に接続した。PC は、東芝ダイナブック、Intel Dual Core-i5 プロセッサ搭載版を使用した。表[3.4-1]に実験環境の性能、機能、設定仕様を示す。図[3.4-2]は、PC 測定画面のスクリーンショットで、認識されたセルの重心に白色のドットをオーバーレイ表示した様子である。36 個のセル重心が認識されたことが確認された。

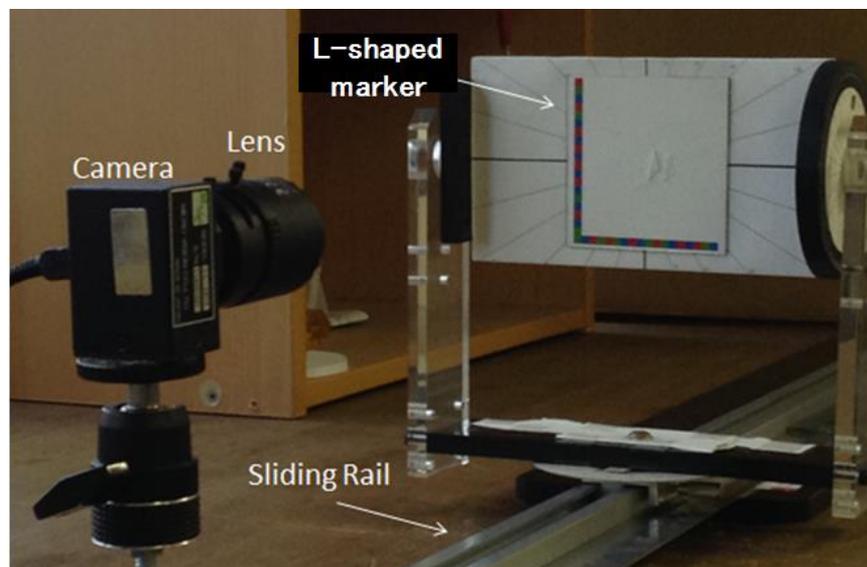


図 3.4-1 測定系

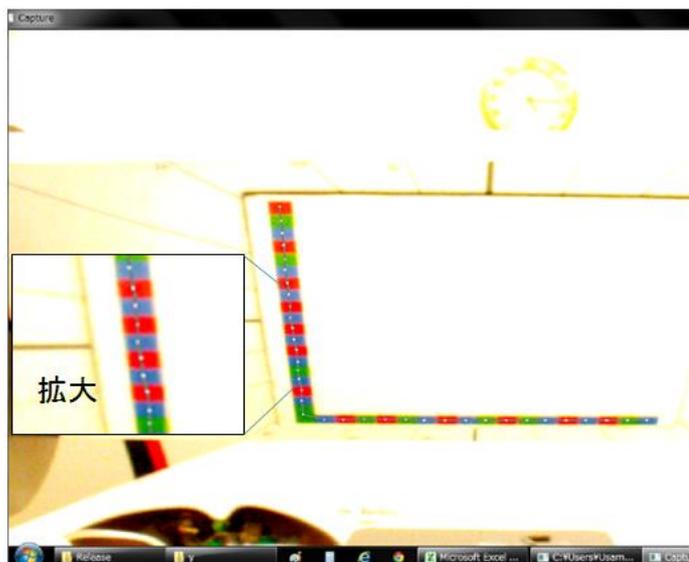


図 3.4-2 測定画面のスクリーンショット

表 3.4-1 実験環境の仕様

アイテム	単位	スペックと設定	詳細
カメラ	Px (ピクセル)	1600 水平画素 1200 垂直画素	マイクロビジョン社 VC-4302
イメージセンササイズ	mm	4.48H×3.36V	
ピクセルサイズ	mm	0.002×0.0028	
レンズ画角	度	35	Tamron 社 MV12VM412
照明	Lx (Lux)	500	白色 LED
照明色温度	K (ケルビン)	5500	

3.4.2 L字マーカの3次元姿勢推定精度の測定

本項ではL字マーカを実験装置上で回転、並進させてスケールでの実測値とソフトウェアの出力値を比較することで誤差を検出する。なおソフトウェアは図[3.3-1]のフローチャートに示すルーチンで実装しPCにインストールした。実験環境にて、回転精度について測定した誤差のデータを図[3.4-3]、図[3.4-4]、図[3.4-5]に示す。各測定は100回計測の平均値。実測を行った。横軸は物理的回転角度、縦軸はソフトウェアから出力される姿勢推定値の誤差である。マーカからカメラまでの距離を300から700mmまで変化させて、それぞれ測定を行った。

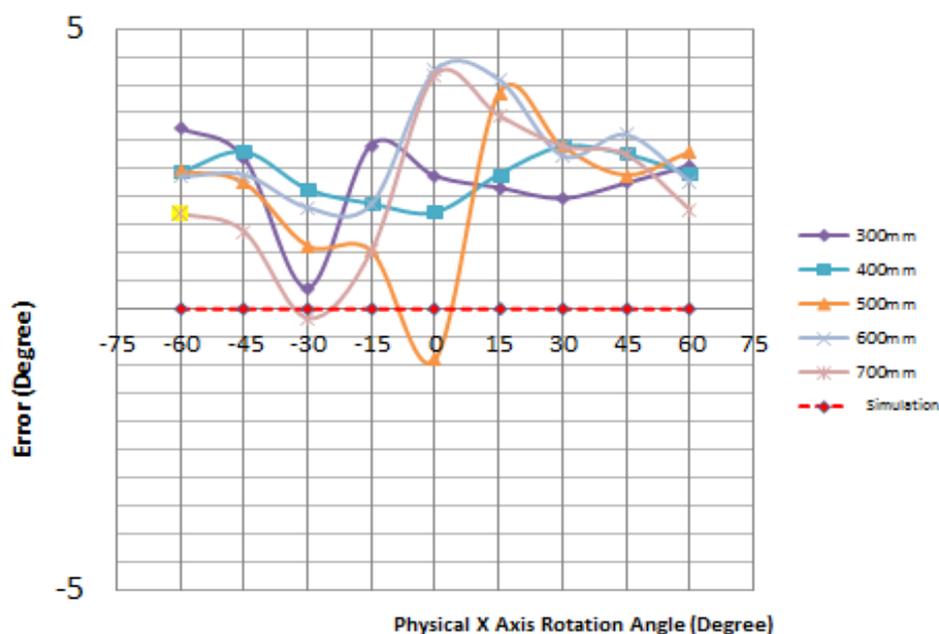


図 3.4-3 X軸回転の誤差

図[3.4-3]では、図[3.2-2]の世界座標系における、L字マーカをX軸方向に15度ステップで回転させたときの角度の物理的実測値とカメラとソフトウェアによる3次元姿勢推定間の誤差を示した。0度付近で、やや誤差が大きくなる傾向があるが、最大誤差はマーカとカメラ間の距離が600mm時で回転角度0度付近において4.5度である。距離が離れる方が、誤差が大きくなる傾向がみられたが、ある程度回転させた ± 45 度付近においては距離による誤差の違いが少ない傾向がある。マーカの2次元面に対して、カメライメージセンサが正対する0度付近では誤差の傾向が大きくなっている。

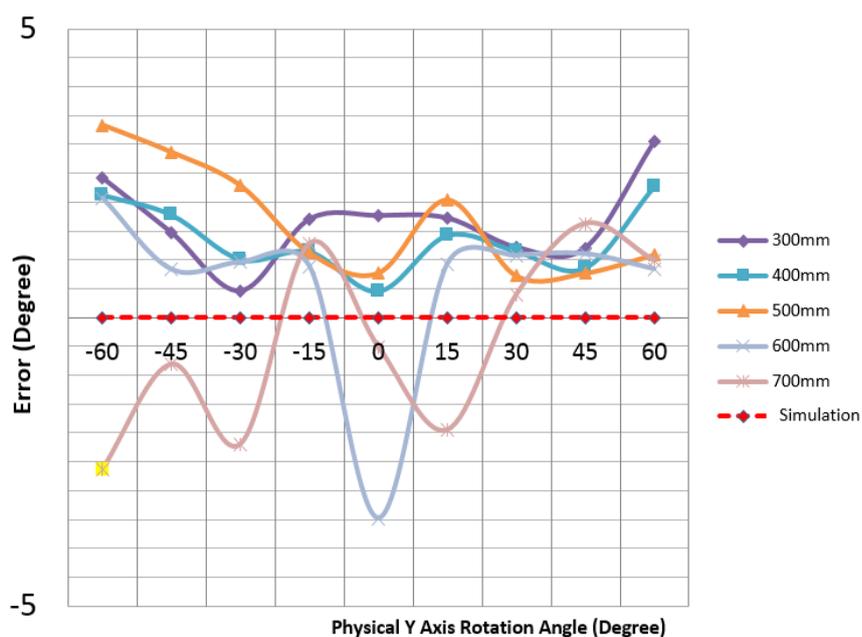


図 3.4-4 Y 軸回転の誤差

図[3.4-4]では、図[3.2-2]の世界座標系における、L字マーカを Y 軸方向に 15 度ステップで回転させたときの角度の物理的実測値に対するソフトウェア出力による 3 次元姿勢推定の誤差を示した。0 度付近で、X 軸方向と同様に誤差が大きくなる傾向がみられた。さらに、角度 ± 60 度付近においても誤差増大がみられた。限界認識角度が影響している可能性が考えられる。最大誤差はマーカとカメラ間の距離が 600mm 時で回転角度 0 度付近において -3.5 度である。距離が離れる方が、誤差が大きくなる点および ± 45 度付近において距離による誤差の違いが少ないことは X 軸回転と同様の傾向である。マーカの 2 次元平面に対して、カメライメージセンサが正対する 0 度付近では誤差の傾向が大きくなる傾向も同様である。

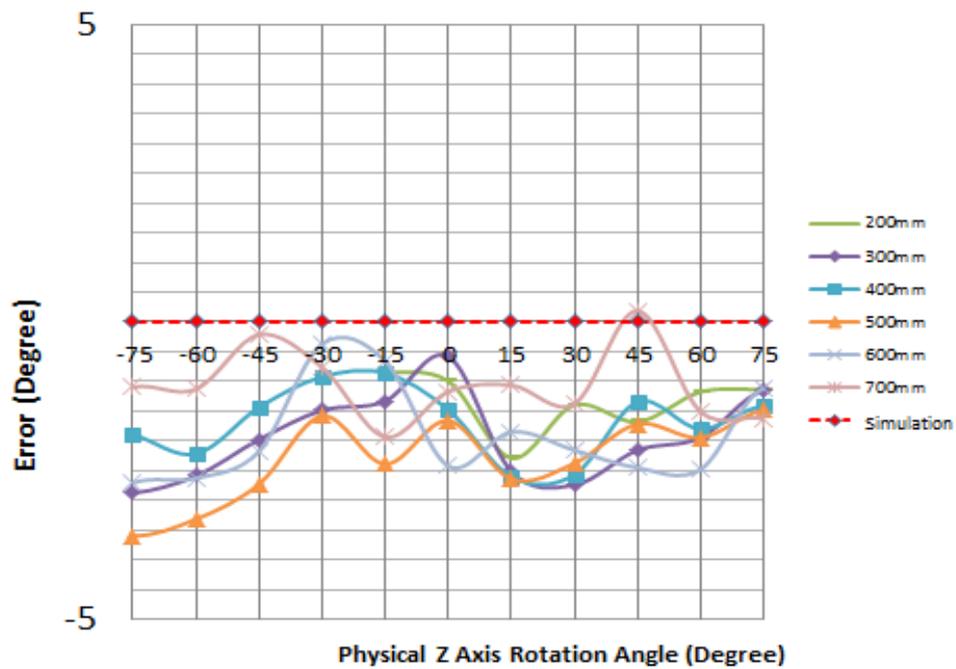


図 3.4-5 Z 軸回転方向の誤差

図[3.4-5]では、図[3.2-2]の世界座標系における、L字マーカをZ軸方向に15度ステップで回転させたときの角度の物理的実測値とカメラとソフトウェアによる3次元姿勢推定との誤差を示した。最大誤差はマーカとカメラ間の距離が500mm時で回転角度-75度付近において-3.6度である。距離が離れる方が、やや誤差が大きくなる傾向はみられるが回転角度による顕著な誤差の違いがみられない。

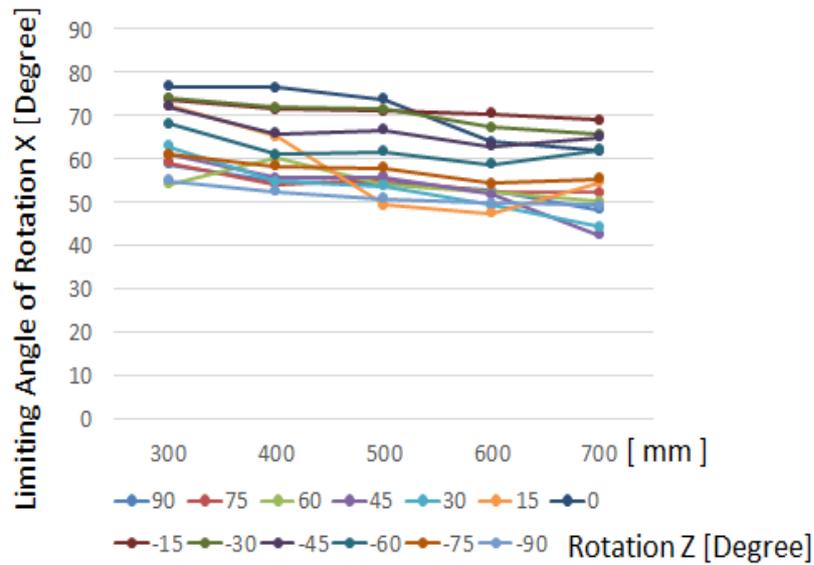


図 3.4-6 Z 軸回転にともなう X 軸の限界回転角度

図[3.4-6]では、図[3.2-2]の世界座標系における、L 字マーカを Z 軸方向に ± 90 度の範囲にて 15 度ステップで回転させながら、X 軸方向に回転させたときの限界認識角度をプロットした。横軸にはカメラと L 字マーカとの距離、縦軸には限界認識角度を示す。距離が遠くなると限界角度が小さくなる傾向がみられた。300mm 距離付近では 54 度以上の傾き限界値が得られたが、700mm では 42 度が限界であった。実体物进行操作する人の手の長さを考えると 500mm 程度の距離までの使用が妥当であり、そのときの实用限界角度は 50 度であった。Z 軸回転の位置における限界認識角度の違いがみられるが、Z 回転と X 回転の明確な相関がみられない。

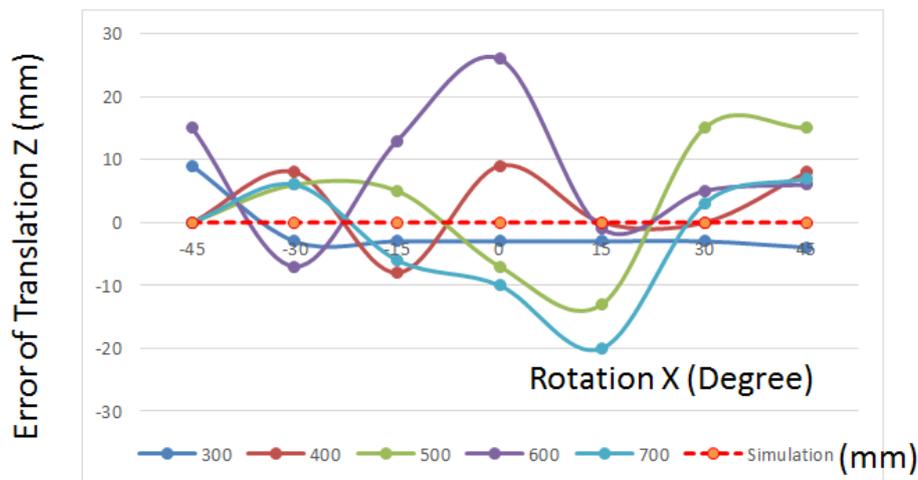


図 3.4-7 X 軸回転にともなう Z 軸方向の並進誤差

Translation（並進）**Z** の測定結果を図[3.4-7]に示す。横軸は **X** 軸方向の回転角度であり、縦軸は **Z** 軸方向における並進を示し、カメラとマーカ間の物理的距離を 300 から 700mm まで変化させた。範囲内での 600mm 距離のとき最大誤差は 26mm (4.3%) 誤差であった。

実験結果から VOIT で必要となる L 字マーカを使った 3 次元姿勢推定における CV 認識の精度がわかった。

3.5 歪曲自由度特性の比較評価

本節では、従来方式である平面に装着されることを前提とした、形状自由度がない従来方式のマーカと L 字マーカの歪曲自由度特性を比較するために簡易評価を行った。

ボリューム曲面を持つ物体として身近に入手できるものとして風船を選択し ARToolKit の拡張方式である NyARToolKit で作成した 3 個のマーカを装着した (図 [3.5-1])。2 章で述べた NyARToolKit では、マーカの認識状態をグラフィクスで容易に確認できる Android アプリケーションが提供されている理由で従来マーカの視覚認識方式として採用した。図 [3.5-1] のように、3 個のマーカの中心点をそれぞれ視覚認識することで物体平面上だけでなく、ボリュームを持った物体の 3 次元姿勢推定が原理的には可能となるとみられる。L 字マーカでは直径 5mm のセル 36 個が L 字型に配列し、マーカのセルサイズを同条件にする理由で NyARToolKit のマーカ 3 個のそれぞれは、5mm × 5mm のセルサイズにした。デコーダソフトウェアを Sharp Aquos 402SH スマートフォンに実装し内蔵カメラ (ピクセル数 940 × 720 に設定) にてマーカを認識させた。スマートフォン内蔵のカメラの画角は公開されていないため、図 [3.3-2] のピンホールカメラモデルを基に実測推定したところ縦方向の画角は約 67 度であった。汎用カメラにはベイヤー配列 [81] の原色 CMOS イメージセンサが使用され、2 画素周期でカラーフィルタが構成されているため、3 × 3 ピクセル程度以上が 1 セルの認識に必要とみられる。カメラ縦方向のピクセル数が 720 個で、カメラから風船表面まで 200mm からの距離において視認画像は、1 ピクセルあたり 0.36mm に相当するため、0.36mm × 3 ピクセルの必要解像度に対して 5mm 角または、直径 5mm のセルサイズであれば視覚認識に対して十分な大きさである。

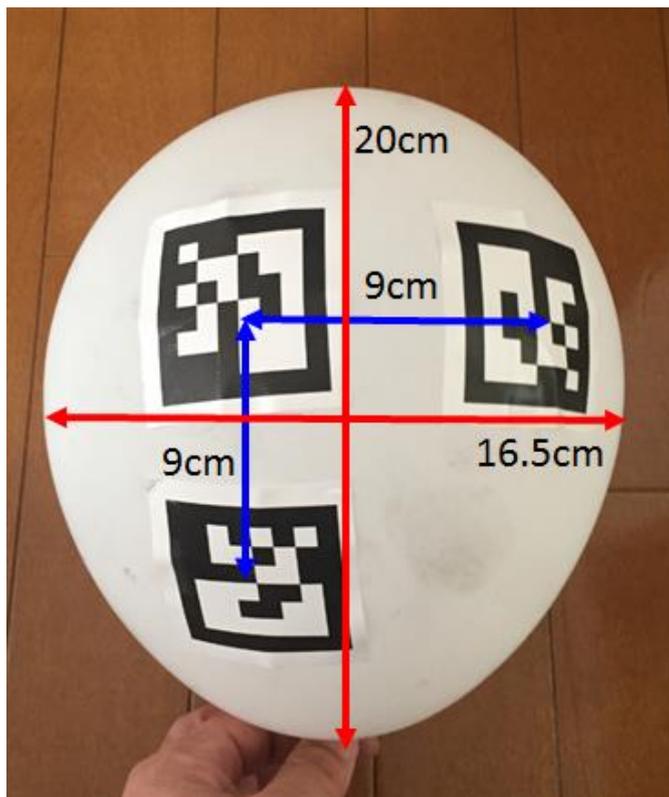


図 3.5-1 風船に装着した従来型 AR マーカ

図[3.5-2]に、NyARToolKit を使った視覚認識の結果をスクリーンショットで示す。左側(A)のスクリーンショットでは、風船上で視覚認識された形状は歪曲しているものの3個のマーカが認識されることが分った。しかし、右側(B)のスクリーンショットのように、風船が指で意図的に歪曲された極度な変形に対して認識のロバスト性を確保するのは困難であり、3個のマーカにおいて、指で歪曲させた部位に近い1個のマーカは歪曲度がもっとも高く、認識されなかった。

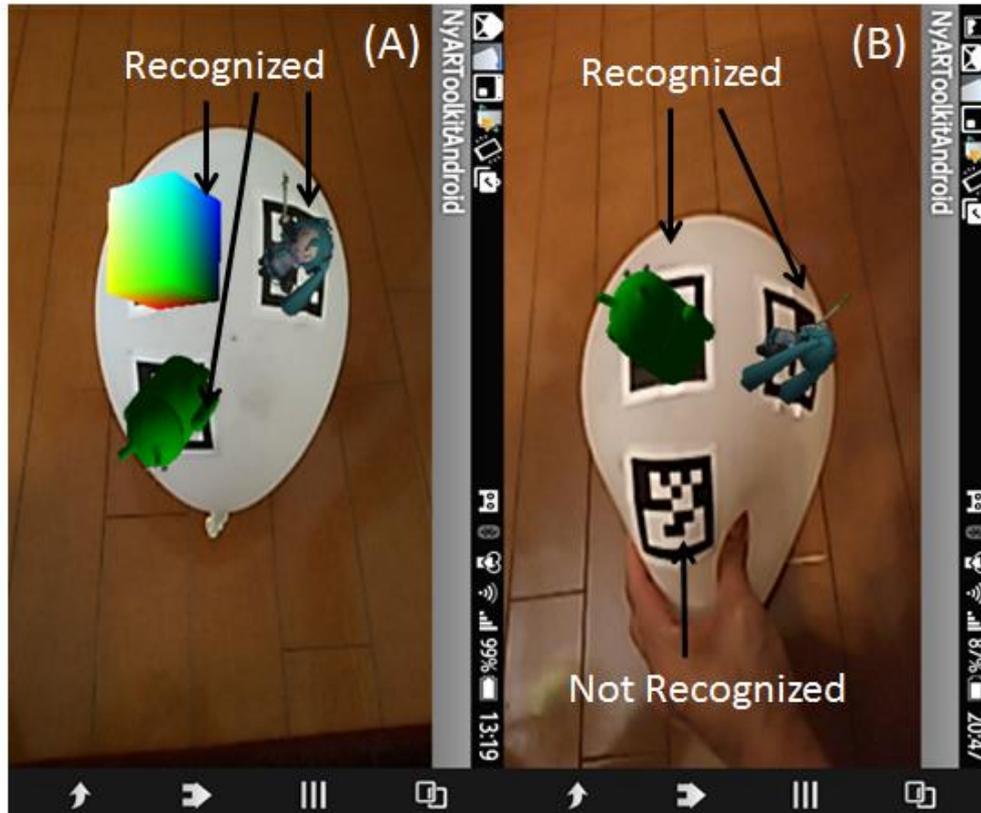


図 3.5-2 NyARToolkit での歪曲評価

図[3.5-3]のスクリーンショットは、前述した L 字マーカを風船上に配置し、デコーダで認識した状態を示す。左側(A)のスクリーンショットは、歪曲のない状態での認識を示す。L 字マーカの周囲にオーバーレイ表示された赤枠グラフィクスは、デコーダが L 字マーカを認識した状態を示す。右側(B)のスクリーンショットにて、指で歪曲させたとき、L 字マーカは 10 回以上の連続撮影においても安定して認識された。図[3.5-3]にて、指で歪曲させた場所は、L 字マーカが図 3.2-2 の世界座標系におけるマーカの 3 次元姿勢推定基準位置（イメージセンサの中心座標に相当）である。他の場所を押すことも可能であるが、歪曲変化量は異なる。本方式では 36 個のセル重心全ての位置を認識しているため歪曲のない状態と歪曲した状態におけるセル間距離、セル重心の変位を比較計測することで歪曲量が計測可能なことを示している。

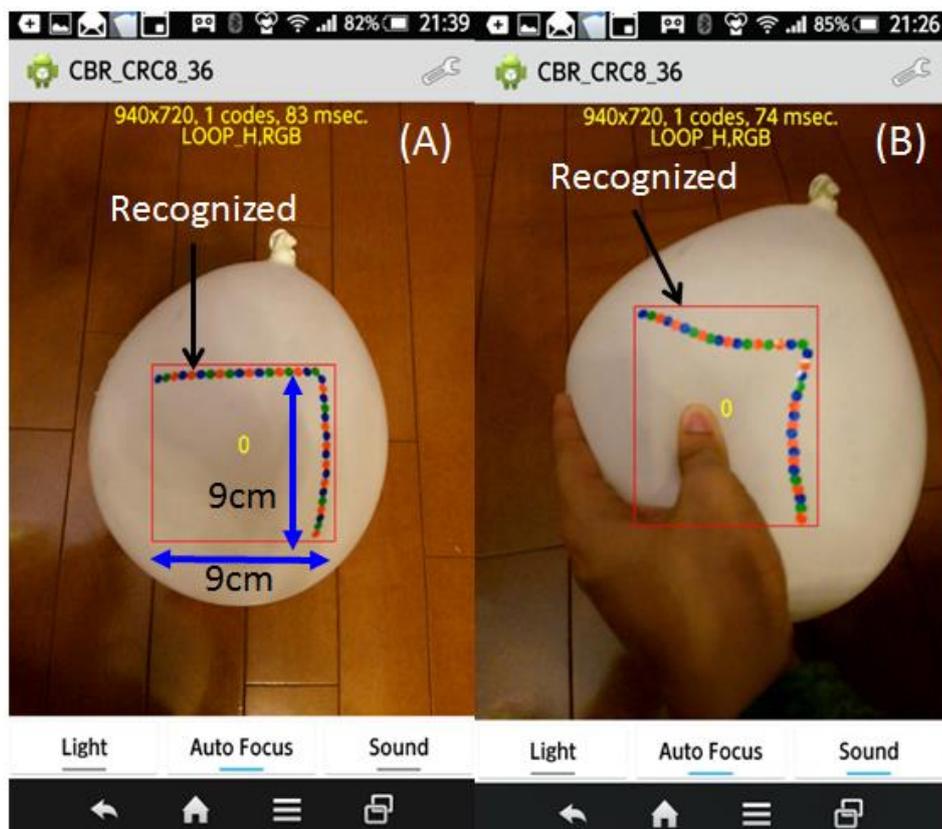


図 3.5-3 L 字マーカの歪曲評価

3.6 まとめ

本章では、VOIT の開発を目指して、第 4 章以降で論述される応用技術で用いる CV 認識用マーカとして開発した L 字マーカの 3 次元姿勢推定に関する基礎実験を行った。カラービットと呼ばれる 1 次元データタグの形状自由度特性を活かして、L 字型に変形させることで L 字化型 2 次元マーカ(L 字マーカ)を構成し 3 次元姿勢推定が可能なことと CV 認識による精度を確認した。また、36 個のセル重心が CV 認識されることが確認されたため、歪みが発生した場合、セルの位置変位により歪み量の測定が可能であることがわかった。(表[3.6-1])

回転では $\pm 1.3\%$ 以内(X, Y, Z 方向)、並進(距離)方向においては $\pm 4.3\%$ 以内の 3 次元姿勢推定の精度を確認した。また、カメラのイメージセンサに正対した L 字マーカを 0 度から傾けていったとき認識が途切れるまでの限界角度が距離は 500mm 距離において ± 50 度であることがわかった。

CVによる認識精度は、カメラの解像度に依存度が高い。本章では、およそ2メガピクセルのカメラにて姿勢推定の実験を行った。実験の再現性を考慮してホワイトバランス、カメラゲインなどの設定値を固定するためにマシンビジョン用カメラを使用した。現代におけるスマートフォンなどコンシューマグレードの装置におけるカメラ性能は年々進化しており中級機以上であれば2メガピクセル以上の解像度を有することが多い。今後、更に画素数の増加が見込まれるため、本章での実験精度も汎用カメラの進化とともに向上するとみられるため、コンシューマ用途を目的とするL字マーカを活用した本研究の方式は5%以内の精度を有するためVOITのために必要十分な3次元姿勢推定性能を有すると評価される。さらに、36個セルそれぞれの重心が計測できることが分かったため、2次元平面上における、L字マーカの歪み量計測が可能なが分かった。

また、付加的な実験として歪曲自由度特性の評価を行った。従来型マーカシステムであるNyARToolkitとL字マーカが物体の歪曲にともなう比較を行った。風船のようなボリューム曲面があり、柔軟性を持つ操作物を使う場合に、従来マーカと比較して従来型マーカの認識が破綻する程度に物体形状が歪曲した場合でも、L字マーカの認識が継続することを確認した。この確認は従来のマーカ方式に比べてL字マーカが歪曲に対してロバストであるという相対評価にとどめた予備実験と位置付ける。

本章ではL字型形状のマーカで実験を行ったが、マーカ平面上で3点の位置情報が取得できればL字型以外の形状にも変形可能であり、それにより対象物体の形状にマーカの形状を合わせやすい方式と考えられるため、実世界に存在する多様な形状に合わせてCV認識する際に優位な方式と考えられる。

表 3.6-1 L字型2次元マーカによる3次元姿勢推定の実現

要件	方式	4象限マトリクスとの対応	従来のビジョンマーカ方式				新開発マーカ		
			カラービット (1次元データタグ)	カメレオンコード (2次元データタグ)	QRコード (2次元データタグ)	ARToolKit (2次元マーカ)	L字型2次元 マーカ	3次元ARマーカ (円柱型)	3次元AR マーカ+ (四角柱型)
3次元姿勢推定		3	X	△	○	◎	◎	◎	
特定物体の区別		3	◎	◎	◎	◎	◎	◎	
形状自由度性		1, 3	◎	X	X	X	◎	◎	
動的歪み耐性		1, 2	◎	X	X	X	◎	◎	
認識方向自由度		4	△	X	X	△	△	◎	
背景環境依存性		3	○	○	○	○	○	△	

第4章 幾何学的整合と高速動作物体への対応

VOIT 実現に向けて、図[4.1.1]に技術要件マトリクスチャートの2象限における「幾何学的整合」と4象限「高速動作物体対応」に分類される要件のうち、本章における技術要件を太字かつ赤枠で示す。なお、黒破線で囲んだ3章の成果が青矢印で示すとおり、本章の要件で活用されるものとする。

本章では、2象限における360度回転方向での認識、動作と感覚の方向一致、マーカの3次元物体形状への対応、4象限における画像歪み対応を行うための開発・実験・評価を行う。そこで本章では3章で実験・評価した2次元平面への装着を対象としたL字マーカの3次元化を行い3次元形状物体への対応を行う。3次元化されたマーカを装着した実体物を人が手に持って回転させたとき、360度回転方向からシームレスにCV認識が継続できることを検証し、物体の方向性や姿勢依存度を低く抑えることで幾何学的整合の完全性向上を実証する。また、高速動作物体対応として、汎用カメラに内蔵されるCMOSイメージセンサに起因するローリングシャッタ歪み現象が、高速物体の認識時に画像歪みの発生でCV認識を破綻させることがある。そこで高速回転におけるローリングシャッタ歪み起因で画像が極端に歪曲した場合でもマーカの継続認識が可能であることを実験で確認する。

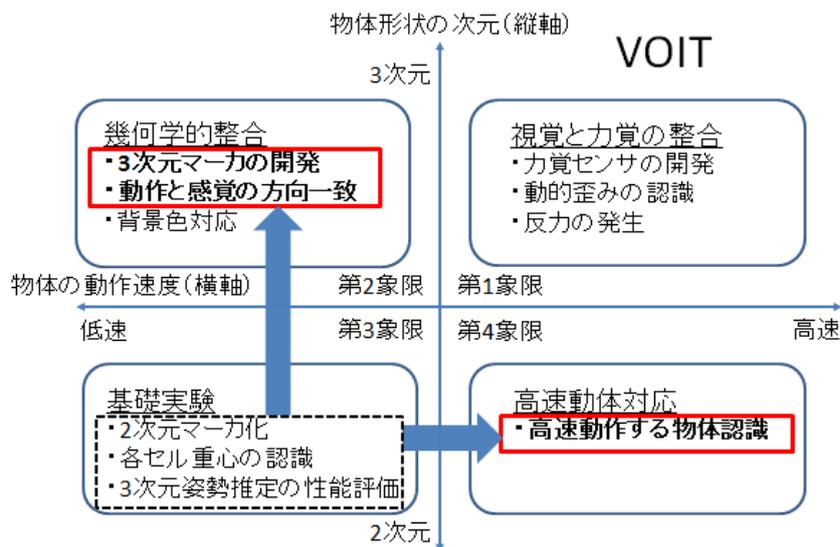


図 4.1-1 4章における技術要件マトリクスチャート

4.1 はじめに

ゲーム業界においてヒューマンコンピュータインタラクション (HCI) [78] は大変期待される技術である。ゲームにおいて、実世界における人の動きをコンピュータに伝えるには、ボタン、キー、マウスなど様々な方法が存在する。人の動きを直観的かつ高速に反映させグラフィクスに反映して表示することは重要と考えるが、携帯ゲーム機などに搭載されたセンサで人の動きに親和性高く正確、高速に距離の変化、回転運動などに対してシームレスにグラフィクス表示させることは容易ではない。

本章で述べる技術の応用例のひとつとして、図[4.1.2]のようなハンドル操作を伴うゲームでの利用、例えばフライトシミュレータにおける電子制御不要ハンドルと汎用デバイスである携帯ゲーム機やスマートフォンなどでの活用を想定したとき、ハンドルは X, Y, Z 軸の高速回転への対応を必要とする。そこで、ハンドルに CV 認識用のマークを取り付け、携帯ゲーム機を操作する人の方向に内蔵された汎用カメラでマークの CV 認識し、ハンドルの高速アクション状況をとらえる姿勢推定を行い、計算結果から携帯ゲーム機の画面にハンドルの動きとゲーム背景を重畳させて表示することを想定した。携帯ゲーム機自体を回転、並進させてジャイロなどを使って制御する方式があるが、ゲーム機の表示画面まで動いてしまう問題がある。本章の方式では、電子制御を伴う専用ハンドル装置を使わず、ハンドルとして使える形状の操作物にマークを取り付けるだけで、ハンドルの高速アクションを伴う HCI 性を備えたゲームにおけるハンドル動作のトラッキングとグラフィクスへの反映ができると考えた。電子制御不要のハンドルは、ケーブル、ワイヤレス通信が不要のため実装と使用が容易で充電不要な利点もある。電子制御不要ハンドルを活用するにあたり、ハンドルに取り付けられたマークを CV 認識する本方式の場合、ハンドルをどこかに固定する必要がなく、ケーブルレスでの使用が実現できるゆえ、人間のアクションに対する操作自由度が高いと考えられる。

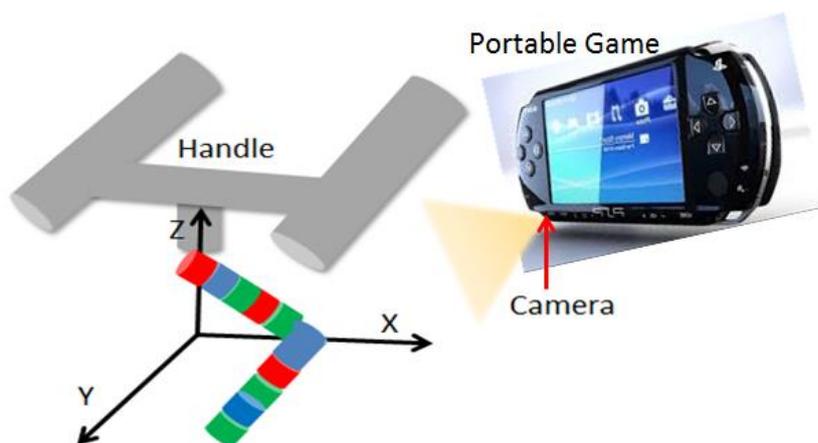


図 4.1-2 高速ハンドル操作をともなうポータブルゲーム

4.2 従来方式

ARToolKit は、カード上など 2 次元平面に印刷された AR マーカの動きをトラッキングして 3 次元姿勢推定を行いマーカの動きと姿勢に同調して実世界の背景にグラフィクス表示を重畳して表現する方式として幅広くゲーム用途などに活用されている。文献[31]によると ARTag と呼ばれる方式が、ARToolKit の認識ロバスト性を高めたと書かれている。

これらの 2 次元 AR マーカ方式では 3 次元姿勢推定のために OpenCV が主に使われている。OpenCV では、カメラキャリブレーションに Z Zang の方式 [79]を用いた関数を使用する。カメラキャリブレーションとはカメラ固有の内部パラメータと、世界座標系における位置姿勢を意味する外部パラメータを求める処理である。カメラキャリブレーションがなされると 3 次元座標を持った点がカメラ画像のどこに投影されるかが計算できる。Z Zang の方式では、従来方式に比べてカメラキャリブレーションを容易にしたが、カメラとマーカの角度を変えて、最低 2 回のカメラキャリブレーションが必要で、4-5 回が推奨と書かれている。事前にカメラキャリブレーションされた AR マーカシステムでは、高速動体トラッキングを行う場合、CMOS イメージセンサで生じるローリングシャッター方式による画像歪み (RS 歪み) を配慮しなければならない。Z Zang の方式では事前キャリブレーションに動的な画像の歪みが考慮されないゆえ、高速動体のトラッキング継続が不安定になる。

更に、ARToolKit, ARTag のような 2 次元 AR マーカ方式では、1 枚のカードの表面と裏面に AR マーカを配置したとしても、表から裏へシームレスにマーカのトラッキングとグラフィクス描画を行うことは困難であり途中で描画が途切れるため、人の感覚に違和感が発生する。

第 2 章で分類したように、マーカレス方式における CV 技術も研究されている。マーカレス方式はマーカ不要である点において優位性があるが、特定物体の区別に適しているとはいえない。また、文献 [80] では、マーカレス方式で視覚認識時に必要とされる大きな計算パワーと、それに伴って増大する消費電力の問題を指摘し、消費電力の改善及び 2 次元 AR マーカの極端な傾きによる CV に関する課題を解決する手法として正六方体の、それぞれの表面に 2 次元 AR マーカを配置する方式が議論されている。正六方体の場合、複数のマーカを同時認識することで、立体物の回転に対してシームレスな認識が可能である。ひとつひとつの AR マーカが 2 次元であるゆえ、RS 歪みの影響で高速トラッキングミスを生じる点及び、事前のキャリブレーションが必要な点においては Z Zang 方式と同様である。また正六方体の場合、3 面の同時マーカの CV が必要ゆえに、計算パワーと消費電力が増える問題が指摘されている。1 つの物体に対して複数のマーカが必要となることが原因とされる。文献 [80] の提案では複数のマーカを認識するのに対し、本提案は 1 つのマーカをトラッキングする為、処理量は小さくなる。高速トラッキングが必要とされるコンシューマグレードの装置を活用した用途において処理量は小さい方が有利といえる。

文献 [81] においては、RS 歪みの補正方式に関して、文献 [82], [83], [84] の成果を改善する内容として RS 歪みの解析と、その補正方式について書かれている。

RS 歪みは、スマートフォン、ゲーム機などで使用されるコンシューマグレードのカメラ（汎用カメラ）で幅広く使用される CMOS イメージセンサの露光及び読み出しタイミングが、ラインごとに異なるゆえ高速動体を撮像したとき、またはカメラ自体が高速移動したとき、撮像画像が変形してしまう現象である。図[4.2-1] (文献 [81] から引用)では、クリスマスツリーが斜めに傾いている。これは、画面上部ラインの露光、読み出しタイミングと、画面下部ラインのタイミングが異なるゆえである。文献 [81] の方式では、画面全体の動きを推定し、ラインを並べなおすことで、画面全体の補正において効果があったが、画面内の小さな動きに対して効果がないと書かれている。つまり、カメラが被写体に対して動いたときには効果的であるが、カメラが固定されて AR マーカなどをトラッキングするには適した方式ではない。文献 [81] で述べ

られているように、メカニカルシャッターを用いて RS 歪みを解決する方法があるが、携帯ゲーム機等に、メカニカルシャッターを搭載する事はコスト面においても技術的にも困難である。それを解決する手法として、文献 [85]では、グローバルシャッター方式の CMOS イメージセンサの研究結果が述べられている。グローバルシャッター方式の CMOS イメージセンサを採用すれば、RS 歪みは生じないがグローバルシャッター方式のイメージセンサは高価であり現時点においてスマートフォンなどのコンシューマグレードの機器への採用は現実的でない。ゲーム用途として汎用カメラを使うことは、コスト面、性能面バランスを考えると妥当な選択と考える。

本研究において VOIT 実現を想定したとき、まず優先されるのは RS 歪みが発生してもマーカの認識が継続することである。従来式のマーカでは認識の破綻が起きたときの問題に対しては、なすすべがない。しかし RS 歪みによりマーカを撮像した画像が歪んだとしても、一旦マーカの認識が成立した後には、前述のように補正する方式が研究されて実用化されている。VOIT で使用するマーカは形状がコンピュータに理解されているため、RS 歪みによる変形なのか、否かを区別することが可能である。



図 4.2-1 ローリングシャッター歪み現象

4.3 提案手法

本章では、第3章で詳述したL字型2次元マーカの形状を3次元化した新しいARマーカを開発した。開発した3次元マーカの活用により、ゲームシーンで人の動きに連動するために必要な、幾何学的整合の観点から360度回転方向からCV認識を可能とすること、人の動作にともなう感覚に親和性が高い事、高速かつシームレスな動体トラッキングの継続性を備えた実体物のCV認識方式を提案する。マーカをCV認識する本方式では、実体物を360度回転させるとき、手や指でマーカを360度回転される方向性とCGでマーカに重畳されて描画されるバーチャル物体と人の手の操作感覚が同調することから幾何学的整合性の問題解決を行うとともに、マーカがRS歪みの影響を受けたときの高速動体に対する対応性を評価する。技術要件としては2次元マーカでの実験でも問題ないが、

4.3.1 3次元ARマーカの考案

マーカの3次元姿勢推定を行いながら360度回転方向からのシームレスな動体のCV認識とトラッキングを可能とするため、第3章で詳述したL字マーカを基に、3次元化したマーカを考案した。L字型3次元マーカにおける、本章での応用名称として「3次元ARマーカ」と命名して呼称するものとする。

第3章のL字マーカを、3次元性を有する「円柱形状物体」にすることで、360度回転に伴いシームレスに動体トラッキングを可能とする3次元ARマーカを新規開発した。(図[4.3-1])本方式では、図[4.3-1]のAからCに示すように、円柱状物体にコードを印刷することで、3次元ARマーカの360度回転にともない常にCV認識を可能とする。

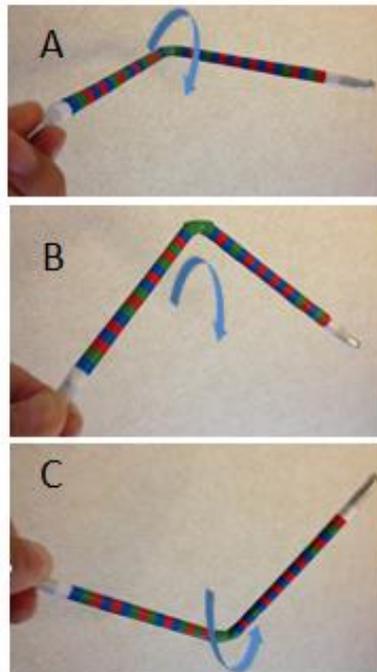


図 4.3-1 3次元 AR マーカ

ゆえに，マーカに重畳されて表示される 3次元グラフィクスを手の動きと同期して人の感覚に合わせて 360 回転しながら表示ことが可能と考えた．「幾何学的整合」の観点で，人がマーカを回転させる感覚とグラフィクスの動きが 360 度回転方向で整合するため違和感が縮小する効果が期待できる．さらに，3次元 AR マーカはコード化されているゆえ，複数のマーカが装着された特定物体を区別して，それぞれのマーカに紐付されたグラフィクスを表示することが可能である．

図[4-3-2]で，円柱系の 3次元 AR マーカを模式的に示す．各セルには，セルとして認識されるときセル重心を白ドットで表示した．Rotation (X,Y,Z)は，世界座標系におけるマーカの回転座標を示し，単位は度とする．ここでセル間距離 Y_a ， Y_b に着目する．図の左側の状態 $(0, 0, 45)$ から $(-90, -90, 45)$ の方向に 90 度マーカが回転したとき，カメラから認識されるセル間距離は， $Y_b > Y_a$ となり，逆方向の $(90, 90, 45)$ の方向に 90 度回転させたときは， $Y_b < Y_a$ となることから，どちらの方向に回転したかが認識できることになり，カメラから見て同様に直線形状で認識される $(-90, -90, 45)$ と， $(90, 90, 45)$ の場合でも，同様の方式で区別することが可能である．

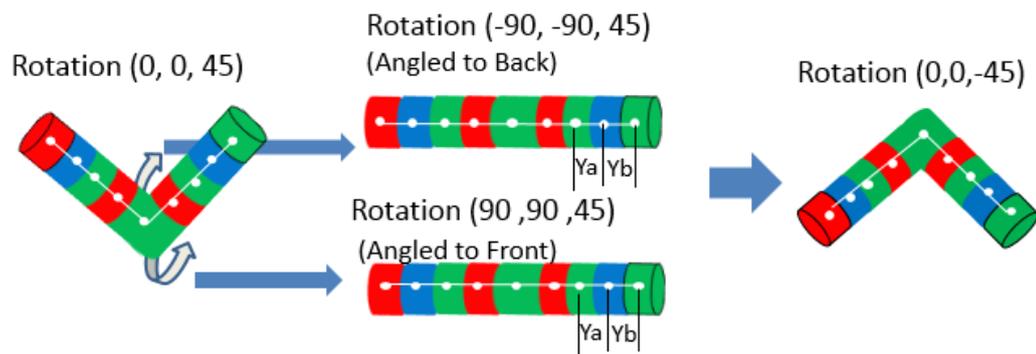


図 4.3-2 3次元 AR マーカの回転

4.3.2 システム構成

図[4.3-3]のフローに基づいてシステムを構成する。フロー①において、汎用カメラで撮像した画像をコンピュータへ取り込む。フロー②において、画面全体からマークらしき画像を切り出す。赤、緑、青のピクセルの塊に対して閾値を設定して推定しセルとして認識する。フロー③のデコード処理においては、先頭の赤セルから順番にセルの色遷移を読み取って行く。セルの一部をエラー訂正ビットとして割り当てる。エラー訂正ビットとして設定された数値と、先頭から後端ビットまでのトータルセルの数が合致すれば、カラービット成立とし、デコードが完了する。フロー④において、カメラに対する3次元ARマーカの姿勢（並進、回転）の関係を認識する必要があるゆえ図[3.2-2]に示す関係で3章にて述べた方式で3次元姿勢推定を行う。フロー⑤では、カメラから得られた実世界の画像に対して、マーカのコード情報に紐づいたグラフィクスをコンピュータ内で重畳する。フロー⑥では、フロー⑤の画像をディスプレイで表示する。



図 4.3-3 3次元 AR マーカ認識のシステムフロー

4.4 実験

本節では実験環境を用意して、考案した3次元ARマーカを高速で動かし、汎用カメラによる視覚認識したときRS歪みが生じた場合でも動体トラッキング可能なこと、および、360度回転させてシームレスにトラッキングし、AR表示出来ることの検証を行う。技術要件としては物体は2次元でも問題ないが、本章での実験では3次元ARマーカ+を用いて360度の高速回転でRS歪みの度合いと継続したマーカのCV認識を評価する。RS歪みは原理的にイメージセンサの2次元平面上において物体形状の次元に関係なく発生するため本章では3次元ARマーカを使って実験を行う。

4.4.1 実験用3次元ARマーカ的设计と作成

第3章では図[3.2-3]のL字マーカを使用し3次元姿勢推定の精度の実験・評価を行った。本項では、セル数、投影されるセルサイズに関して第3章と同様の設計で3次元ARマーカを作成しCV認識による実験・評価を行う。

イメージセンサ平面と正対する平面投影視において、すべてのセルは縦横 4mm の正方形とし、総セル数は 36 セルとする。図[4.3-1][4.3-2] に示すように、3次元 AR マーカは直径 4mm の円柱形状を有する 3次元物体である。各セル重心の間隔はそれぞれ 4mm である。円柱形状は直径 4mm のアルミニウム棒を L字型に折り曲げて作成し、カラービットの印刷を行って 3次元 AR マーカを構成した。実世界で人間の手で 3次元 AR マーカを動作させる実用的な範囲としてカメラまでの距離を 300 から 700mm と想定する。距離範囲、イメージセンサの解像度およびレンズ画角の観点から必要十分な CV 認識が出来るセルサイズをピンホールカメラモデルより計算して縦横 4mm の正方形とした。測定系は、3章の実験と同様である。

イメージセンサ表面に投影された各セルの動的な重心変化を撮像することで姿勢推定を行い、CV 認識により CB 成立が継続的に可能かどうかの判断で動体トラッキング性を検証する。

4.4.2 測定内容と環境

3次元 AR マーカの動体トラッキング特性を測定し、360度回転方向から CV 認識できること、汎用カメラで RS 歪みが生じてもトラッキングが可能なこと、また、トラッキング精度に関して検証を行う。回転テーブル上に配置された 3次元 AR マーカの速度を変えて回転させ、人の動きを想定したな回転速度で動体トラッキングが可能かどうかを検証する。さらに、時間軸に対して、回転テーブルの物理的回転位置と、カメラが動体をトラッキングして 3次元姿勢推定でコンピュータソフトウェアから出力される回転 (X, Y, Z) 値を比較することで精度の確認と実時間性の検証を行う。また、人の手によるマーカの 360度回転にともない、シームレスにグラフィクス表示が継続され、かつ人の感覚とグラフィクス表示が違和感なく整合できることの確認を行う。測定環境として、3章の測定系に対して、図[4.4-1]に示すように、マーカ用回転テーブルを追加し、その上に 3次元 AR マーカを配置した。カメラをスライディングレールの上に配置し、回転テーブルからの距離を正確に把握できるようにした。汎用カメラは 3章と同じローリングシャッタ方式の CMOS イメージセンサを内蔵したマイクロビジョン社の VC-4302 を使用した。内蔵イメージセンサは、Aptina 社 MT9D131 (横 1600 , 縦 1200 ピクセル) である。カメラ設定および照明条件は、3章での実験と同じものとする。



図 4.4-1 測定装置

回転テーブルに直流を加えることで回転駆動し，供給電圧に対して一定速度で回転するよう校正した．また，測定系は暗箱で覆い外光の影響を排除することで一定の測定結果が得られるようにした．照明は，常に被写体位置において 500-Lx になるよう調整した．なお，シャッタースピードは，被写体のブレが影響しないように 500 分の 1 秒に設定した．また今回の測定ではカメラから 3 次元 AR マーカまでの距離を 300mm に設定した．デコードソフトウェアも第 3 章と同じものを使用する．

4.4.3 観測と測定

図[4.4-2]の PC スクリーンショット画像は，静止状態の 3 次元 AR マーカの CV 認識状態を示す．カメラで 3 次元 AR マーカが撮像されて，かつデコードされ CB が成立したとき，それぞれのセルに白ドットをオーバーレイ表示するようにした．図[4.4-2]の拡大部分はオーバーレイ表示を見やすく表示したものである．図における 3 次元 AR マーカは，カメラで撮像された画像であり，白ドットはマーカに印刷されたものではない． CV 認識によりコードが成立したとき，白ドットを 3 次元 AR マーカに重ねて描画し，各ドットをラインで結んで表示するようにした．それぞれの白ドットは， CV 認識されたセル重心に配置され静止状態で 3 次元 AR マーカが正しく認識されること

を PC スクリーンショットにて目視確認した。このドット及びライン表示がなされていれば、トラッキングが出来ていると判断する。

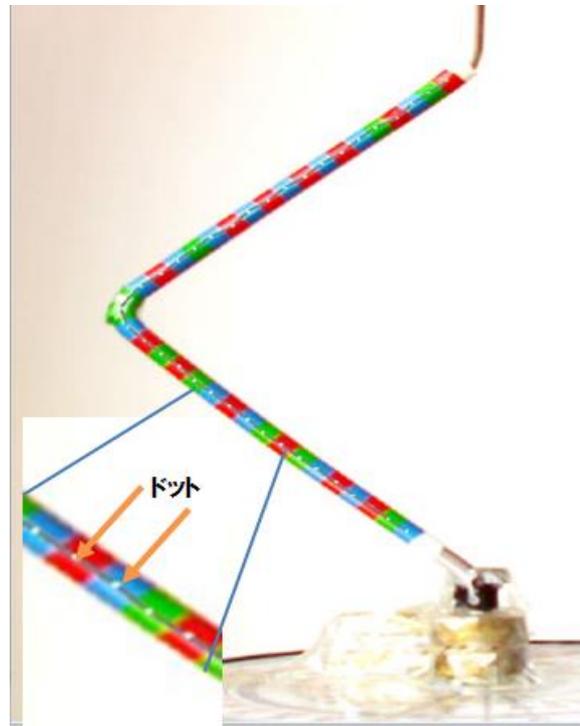


図 4.4-2 認識された 3 次元 AR マーカ

3 次元 AR マーカの動的状態を CV 認識した観測結果を図[4.4-3]と[4.4-4](スクリーンショット)に示す。図[4.4-3]と[4.4-4]は図[4.4-2]と同様に、CV 認識による CB 成立をドット描画により目視トラッキングにて確認できるものとする。

図[4.4-3]においては 17.5-RPM (Rotation Per Minute) 回転速度のときには、RS 歪みが観測されないことが目視確認できる。33-RPM 回転時では、RS 歪みが出始めていることが目視できる。45-RPM 回転では著しく歪みが生じている。

図[4.4-4]で、60-RPM 回転時には、さらに著しい RS 歪みが観測されるが、各セル上にドットが正しく描画されており、高速動体トラッキングできることが確認された。

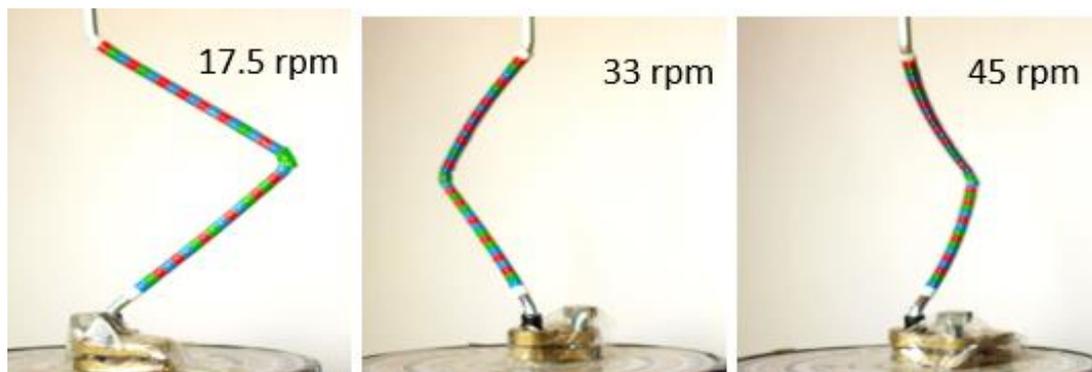


図 4.4-3 3次元 AR マーカの高速回転と RS 歪み

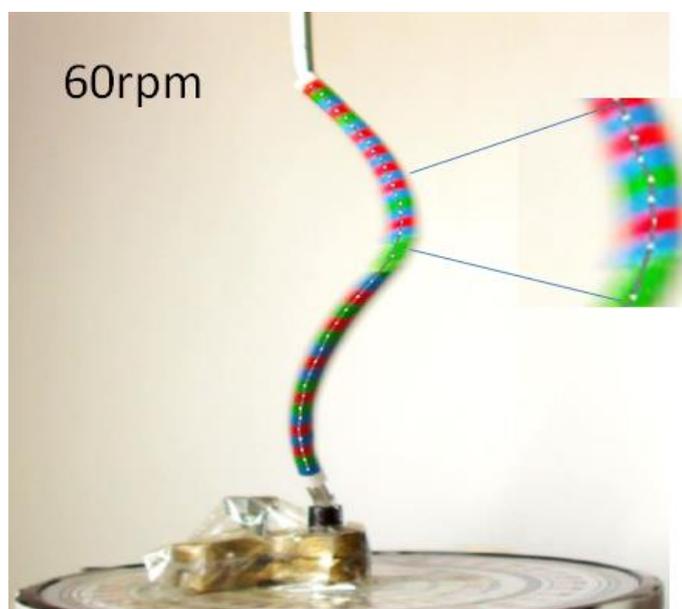


図 4.4-4 著しい RS 歪み時におけるマーカのトラッキング確認

人の動きの高速動体トラッキングにともない違和感なく AR 表示するためには 3 次元姿勢推定の精度確認が必要である。また、実時間性も重要な要素である。3 次元姿勢推定には、OpenCV の関数を用いたが、カメラキャリブレーションは行っていない。図[4.4-5]は回転テーブルの上面視であり、360 度回転にともなう 3 次元 AR マーカ、カメラの位置関係を示す。

カメラと 3 次元 AR マーカは世界座標系において、回転 $(0, 0, 45)$ 、並進 $(0, 0, 300)$ の位置を起点とする。図[4.4-6]は図[4.4-5]で示される関係を元に、時間軸に対する物理回転角度（青線）および、カメラで捉えた姿勢推定（回転）（赤線）の測

定結果である。横軸は実時間の経過を表し、縦軸は物理回転角度とソフトウェアで計算されて出力された 3 次元姿勢推定からの回転値を示す。人の動きに対する実時間性及び、360 度全域にて回転トラッキングがなされていることが確認された。一方、 -90 、 $+90$ 度付近において、姿勢推定の誤差が大きくなる傾向があり最大 7% であることが分かった。

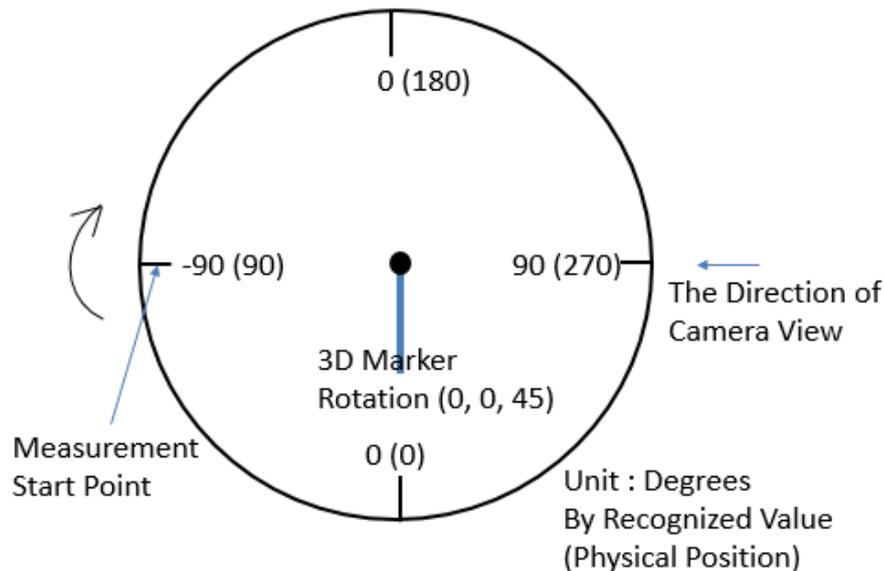


図 4.4-5 回転角度と 3 次元 AR マーカの位置関係

次に、3 次元 AR マーカの 360 度回転と描画実装の検証を行った。第 3 章の方式と同様に OpenCV の関数で 3 次元姿勢推定した回転 (X, Y, Z) , 並進 (X, Y, Z) の出力数値を、OpenGL [86][87]に渡し、6 方体スケルトンの 3 次元 CG オブジェクトを 3 次元 AR マーカの 360 度回転に追従して描画させた。図[4.4-7]のように、手による回転に追従させながら描画できることが確認された。手と指を使って回転させる感覚に対して、同じ方向に CG オブジェクトが回転して見えるため方向性の一致から違和感縮小に効果があると評価される。ただし、図[4.4-6]で観測された誤差の領域付近で若干のブレがあったが大きな違和感はなく、シームレスな 360 度回転と追従描画ができた。

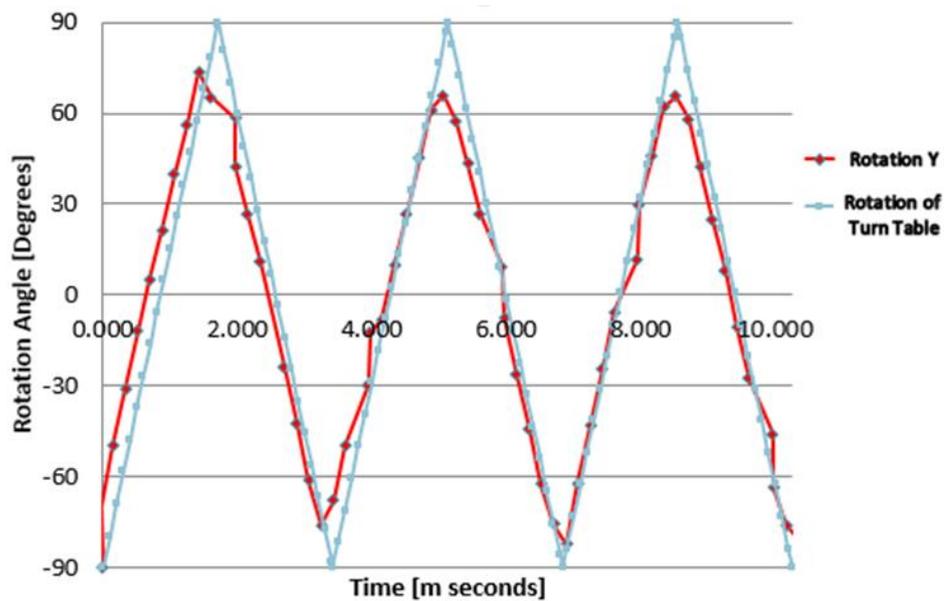


図 4.4-6 時間経過に対する物理回転と 3 次元姿勢推定値

本方式では、赤、緑、青セルの遷移を CV 認識しているので、背景に有彩色が混じるとマーカと背景の区別がつかず動作が不安定になることが確認されたが無彩色背景の室内等において CV 認識が正しく動作する。

本方式では特定角度からの CV によるオクルージョンは別課題とするが、視認方向によりオクルージョンが生じる状態を図[4.4-8]に示す。このような角度からカメラにて CV 認識を試みると、セルのカラーがオーバーラップして、オクルージョンが生じマーカ認識できなくなることを確認している。本方式においてオクルージョンが発生せず正しく CV 認識によりマーカトラッキングできる条件は、マーカ上に配置されたセル色それぞれが、別のセル色と交差しない視認方向の範囲で使用するることである。

3 次元 AR マーカが 3 次元形状の物体で使用可能なこと、およびマーカの高速度トラッキング性を実証したため、柔軟物のような形状が動的に変化する 3 次元物体の認識にも活用できることが分かった。

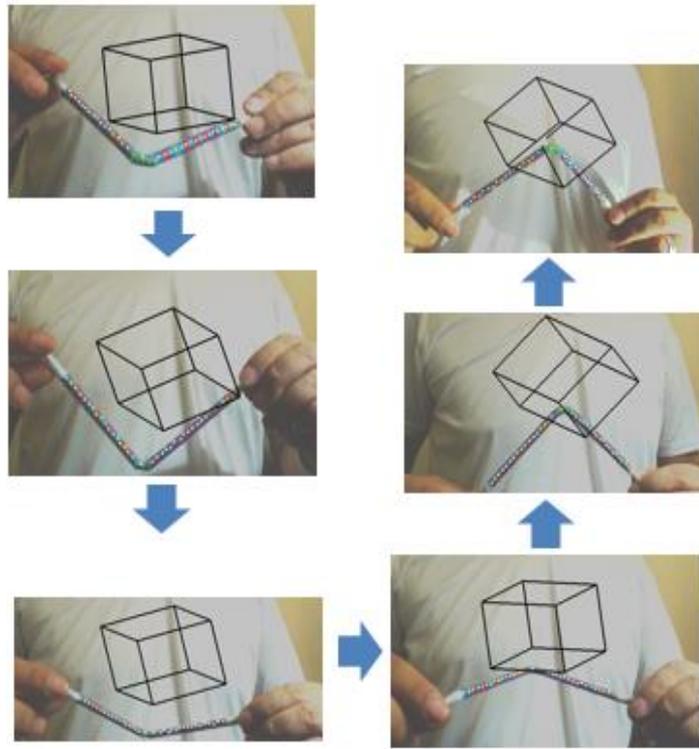


図 4.4-7 マーカの 360 度回転と CG オブジェクトの描画



図 4.4-8 視認方向におけるオクルージョン

4.5 まとめ

3次元形状物体のCV認識継続およびマーカに重畳描画されるグラフィックスの回転と視線の一致により360度回転方向より違和感なく3次元実体物の姿勢推定が可能であることから技術要件マトリクスチャートの2象限における「幾何学的整合性」の高さが確認された。ゲーム用途を想定し人による高速なアクション操作にシームレスに追従する3次元ARマーカを開発した。人がマーカを装着した物体を回転させたとき、360度回転方向からシームレスな3次元姿勢推定を実現し、物体の方向性や姿勢依存度を低く抑えることで幾何学的整合の完全性を高めた。このとき、実際に手で3次元ARマーカを指で回転させている人の感覚と整合をとりながらグラフィックスを追従描画できることを確認した。さらに要件マトリクスチャート4象限における「高速動作対応」の観点において、マーカの高速回転におけるRS歪み起因で撮像された画像が歪曲した場合でも継続認識が可能であることを確認した。マーカは認識されることが優先される要件であり、RS歪みで認識が破綻することは許されない。本章の方式ではRS歪みが発生してもマーカが認識されるため、認識されたあとにRS歪みを被写体の本来の形状に補正することは可能である。(表4.5-1)

発生した認識誤差の原因は、図[4.5-1]に示す3次元ARマーカの曲がり部分（アルミニウム棒を曲げたとき生じた）が若干ラウンド形状になっていることに起因すると考えられるゆえ、今後3Dプリンタなどで作成することで精度の向上が必要と考える。

特に、本章で想定するハンドルの高速回転をトラッキングするようなゲーム用途においては45-60rpmの速度で回転する実体物のCV認識を必要であり、汎用カメラ使用時におけるRS歪みが生じた場合においても、ARマーカをトラッキングし続けることは効果的である。本章で論述した技術は、今後、高速アクション物体のCV認識を活用したHCI性の高いゲーム用システムの新たな用途開発に貢献できるものと考ええる。

3次元形状物体への幾何学的整合をともなうCV認識と高速動作によるトラッキングの継続を確認した。この結果によりVOIT実現につながる技術を開発・検証できた。

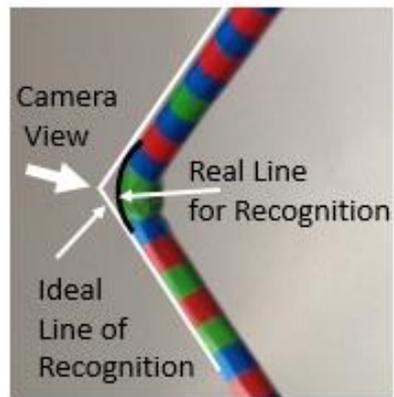


図 4.5-1 3次元 AR マーカにおける、曲がり部分の現実ラウンド形状と理想ライン

第5章 背景色対応による使用環境の拡大

本章では、VOIT 実現に向けて、図[5.1-1]に技術要件として俯瞰され2象限における「幾何学的整合」に関連してマーカの背景色対応を行い、第4章で開発した3次元ARマーカの形状を「四角柱形状」にしたマーカを開発することにより背景色問題を解決することで使用環境範囲を拡大する技術について論じる。題材として、VRゲーム応用を想定しながら各種実験や評価を行う。なお本章では図[5.1-1]の青矢印で関連性を示すとおり、第4章で開発した「3次元ARマーカ」の成果を活用して、さらに新規開発を行う。また本章で技術要件対応する部分を太字で表し赤枠で示す。

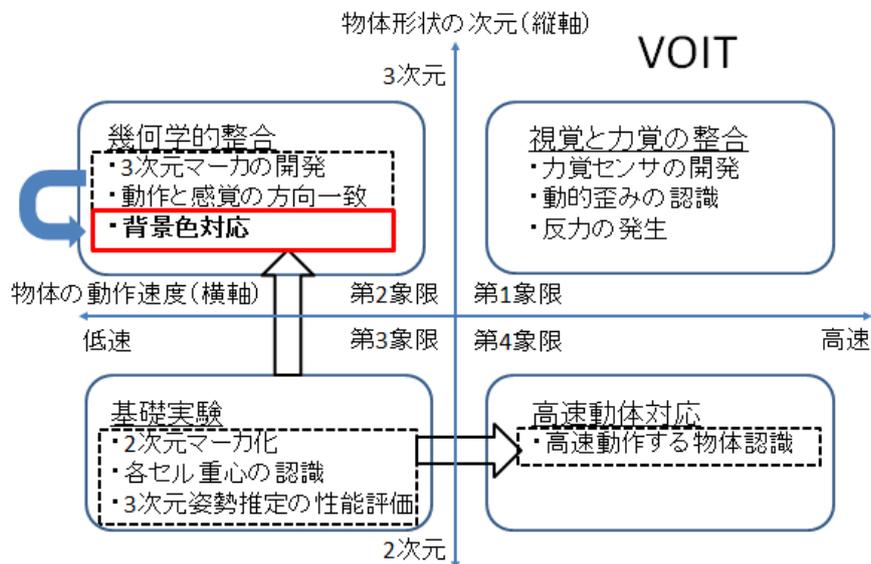


図 5.1.15 章における技術要件マトリクスチャート

5.1 はじめに

VRは、ゲーム業界において極めて有望な技術であり、様々な研究と開発がなされてきた。昨今では、Oculus Rift[88]の登場があり、コンソールゲーム機であるPlayStation 4[89]に接続して使われるPlayStation VR[90]が発売され、急速にVRゲームに対するユーザの期待が高まってきている。一方、Oculus Riftは高性能であるが、ハイパフォーマンスPCを接続して使う必要があるため、システムが高価であり未だ手軽に楽しめる域には達していない。さらにVR普及への課題としてあげられるのが、実体験ともなわずに楽しさを伝えるのが困難である点であろう。TVコマーシャルや

ウェブサイトなどのメディアで、没入型 VR の面白さはユーザに伝えきれないと考えられる。そこで、性能、機能は専用機である Oculus Rift などに及ばなくとも、家庭やモバイル環境など、様々な環境で VR 体験できるシステムを提案することが VR ゲーム普及を加速する上で重要な課題であると考えられる。

人のアクションをともなう VR ゲームでは、没入型 HMD 装置 (VR ゴーグル)、PC および、手の動作をフィードバックするためのゲームコントローラなど電子制御をともなう装置で構成されるシステムが一般的であり、このようなシステムの場合、手軽に持ち運んでモバイル環境や家庭で VR アクションゲームを楽しむのは容易ではない。また、手の動作をシステムにフィードバックできるコントローラがないとゲームの臨場感が不足することが考えられる。そこで、今後、普及を促すには汎用コンシューマグレードの装置でのシステム実現と可搬性を有し、多様な環境で使用できる VR システムが必要であると考えた。

第 4 章において、図[5.1-1]で示す 360 度回転方向から途切れなく CV 認識およびマーカのトラッキングを可能とする「3 次元 AR マーカ」を開発し、幾何学的整合性に関する完全性を高めることができた。その応用で本章のようなコントローラと人の位置関係が重要な VR ゲーム用途を目的とした活用にも期待ができる。しかしながら第 4 章で論述した方式は背景色が限定されるため環境色に対する自由度が低く、マーカの背景に有彩色が含まれる場合マーカで用いられる赤、緑、青と背景の色分離が十分になされないとき動作が不安定になる問題があった。その観点において多様な環境での使用に課題があった。

そこで本章では、動作環境を拡大するために有彩色背景でも安定した CV 認識が可能で、トラッキングが継続動作する方法を検討する。多様な環境での動作を可能にすることで、成果として VOIT の適用範囲拡大を目的とする。その際、L 字型 3 次元マーカの 1 種として、本章における応用名として「3 次元 AR マーカ+」と呼称するマーカを提案、開発することで 3 次元姿勢推定に関する実験と評価を行う。環境色依存性問題を解決することでモバイルや家庭など多様な環境で体験可能な VR システムを提供することで社会への普及拡大を目指すものとする。

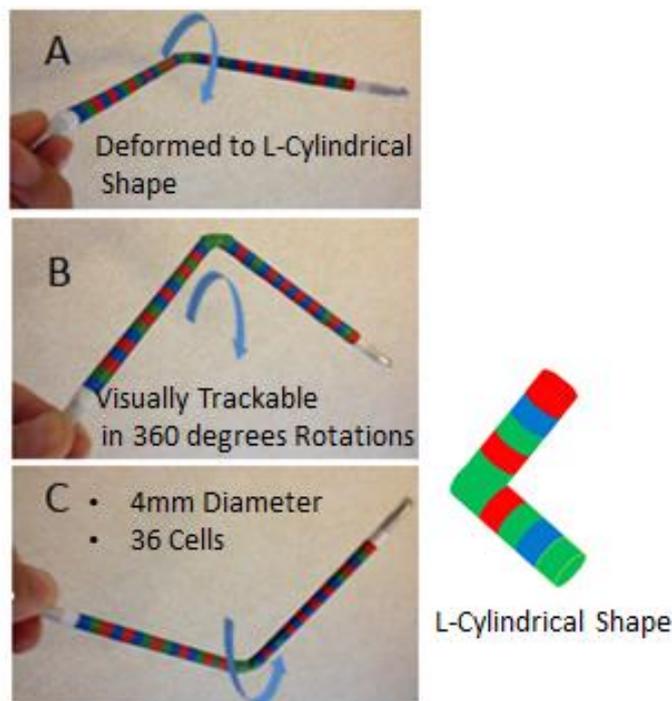


図 5.1-1 4章で開発した3次元ARマーカー

5.2 関連研究

ゲームコントローラに代わる手段として、手や指のジェスチャを光学式センシング技術で認識するデバイス Leap Motion [91][92]は、Oculus Riftなどのシステムに接続して使用可能で、VRゴーグルの前面に装着することでユーザインターフェースとして使用することが可能である。しかし、物理的なハンドルなどが存在しないため、人が実体物を操作しているという感覚が得られないため、違和感が発生する点においてHMI性に課題があると考えられる。

一般家庭に広く普及しているコンソール型ゲーム専用機としては PlayStation 4, Microsoft XBOX [93], Nintendo Wii[94]が存在する。これらはVRゲームを処理するために十分な計算能力を有するが、人の動きをトラッキングしコンピュータにフィードバックするには専用の電子制御されたゲームコントローラやセンサを必要とする点で、手軽な可搬性を考慮したシステムではなく主に据え置き用システムである。

5.3 提案手法

本節では、VR アクションゲームの体験場所の背景色の依存性を排除し、動作環境範囲を広げるために開発した 3 次元 AR マーカ+の仕組みとマーカを活用して VR アクションゲームシステムを構成する手法について提案する。

5.3.1 想定 VR ゲームシステム

本章では、図[5.3-1]に示すようなシステムを想定する。スマートフォン、Google Cardboard と呼ばれる簡易 VR ゴーグルおよび電子制御不要のハンドルに装着された 3 次元マーカといったコンシューマグレードの装置のみを用いて可搬性と低コスト性を備えながら高速な手の動きをアクションゲームに反映できる新しい VR ゲームシステムを検討した。VR ゴーグルに装着されたスマートフォン内蔵カメラを使ってマーカを CV 認識し、デコード、3 次元姿勢推定によるトラッキングなどの処理を内蔵ソフトウェアにて行うことで手軽に楽しめる没入型 VR アクションゲームの実現を検討した。



図 5.3-1 VR システム

本章では高速な手の動きをハンドルに装着されたマーカを CV で認識およびトラッキングし、ゲームシーンへフィードバックする方式を検討する。

想定される1つの適用例として、図[5.3-1]に示すようなVRアクションゲームシステムでハンドルなど手持ちデバイスに3次元ARマーカ+を装着して使用することが考えられる。バイクのレーシングゲームにおいて平坦なレーシングコースを複数のバイクが走行するとして、突然、仮想引力を持った一本橋のシーン(図[5.3-2])が登場する。このシーンでは、ハンドルを手の動きに同期して回転させながら一本橋上でバイクをローリング走行させて前のバイクを抜き去ることが可能となる。このような体験はVRでないと不可能である。

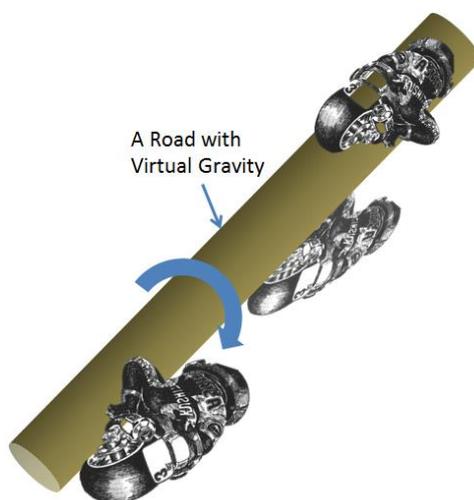


図 5.3-2 仮想引力を有する1本橋

5.3.2 3次元ARマーカ+の開発

図[5.1-1]に4章で詳述した3次元ARマーカを示す。マーカ形状を円柱型にして360度回転にともない途切れなくマーカトラッキングできる技術として3次元ARマーカを開発した。しかし、図[5.1-1]の3次元ARマーカには背景色とマーカセルそれぞれの色を区別する領域である無彩色のクワイエットゾーンが存在しないため、背景色に有彩色が存在すると混色によりCV認識によるマーカのトラッキングが不安定になる問題があった。

そこで、図[5.3-3]に示すように、四角柱を90度L字型に曲げた形状物にCBをCB1, CB2, CB3, CB4のように4面に装着し、CB1, CB2, CB3, CB4の間に白色のクワイエットゾーンを設けることで確実に背景から色分離され、背景色の影響を受けずに4つのCBのいずれかが360度回転方向から常に認識されると考えた。4つのCBの間に配置されるクワイエットゾーンを四角柱形状の角の部分に配置することで背景とマーカを確実に色分離する方式である。3次元ARマーカの場合、常にCV認識され

るマーカは1個であるが、3次元ARマーカ+の場合、回転方向により1個または2個のCBが視覚認識されるとみられる。そのため、2個認識されたときはセル重心の平均値を持って3次元姿勢推定データとすることが望ましいと考える。3次元ARマーカ+においても図[3.2-3]に示す3次元ARマーカと同じセルの設計を行う。セル間距離は4mmで加重平均をとってセルの中心位置を計算し、3章で詳述した方式と同じ論理を使い36セルで構成されるL字マーカがカメラのイメージセンサの2次元面に投影されることで、並進(Translation)と、回転(Rotation)値を取得しマーカの3次元姿勢推定を行う。

3次元ARマーカ+で使用するCBには2次元式と3次元式が存在する。図[5.3-3]におけるCB1およびCB4は2次元マーカであるが、CB2およびCB3は3次元要素を含むマーカである。

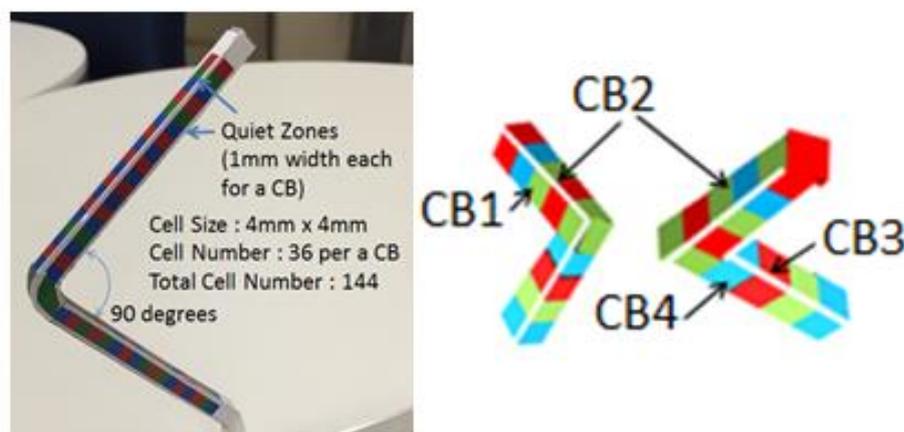


図 5.3-3 3次元ARマーカ+

図[5.3-4]では、CV認識におけるカメラの方向性を示す。4章で開発した3次元ARマーカまた、本章での3次元ARマーカ+の、どちらの方式にも共通する問題点として、Camera View Aの方向からカメラにより視覚認識を行うときは、360度回転にともないトラッキングが継続できるが、Camera View Bの方向からは、CV認識ができない。しかし、図[5.3-5]のように六面体の6面に、それぞれL字マーカを装着すれば全方位から継続してCV認識できると考えられるが、図[5.3-5]の仕組みは、3章で詳述した仕組みと同じ2次元マーカの組み合わせであり、本章では3次元マーカにおける背景色との分離を目論見とするため完全な全方位性は検討対象外とする。

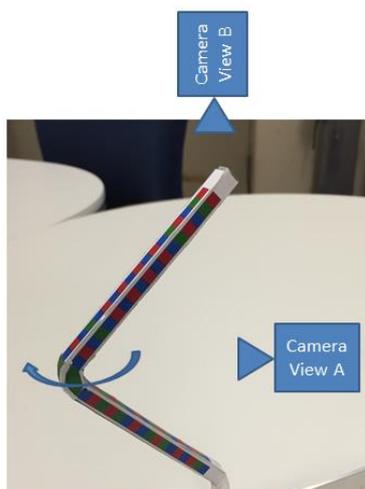


図 5.3-4 マーカ視覚認識の方向性



図 5.3-5 全方位マーカの例

5.3.3 システム構成と動作フロー

VR アクションゲームを想定したシステムは紙とプラスチックレンズで出来た簡易 VR ゴーグル、スマートフォン、3次元 AR マーカ+が装着された手持ち操作ハンドルのみで構成され、図[5.3-6]のような動作フローを提案する。没入型 VR ゲームは人のアクションをとまなうが、通常、安全性に配慮し椅子に座った状態での使用が推奨される。しかし没入状態では実世界に存在する手持ち操作のハンドルを視認することができないため、ゲームをスタートする前はスマートフォンのカメラをビデオシースルーモードにセットし、VR ゴーグル装着時に手元が見えるようにする。ハンドルを手にして3次元 AR マーカ+が認識された時点で没入ゲームモードに遷移する。マ

一カが認識されるためには、まず、マーカらしい被写体を検出しマーカを画像から切り出してデコードすることが必要である。

デコードされた 3次元 AR マーカ+の 36セルの中心にある 36個のドット（イメージセンサ上に反映されるドットのピクセル位置）から 3章で詳述した方式により 3次元姿勢推定を行う。4章の方式と異なる点は、複数の L字マーカを同時認識する点である。その後、Rotation (X, Y, Z), Translation (X, Y, Z)の計算値をゲームアプリケーションにフィードバックすることで人が操作するハンドルの動きをバイクなどスマートフォン上にディスプレイされる画像の動きとして反映させる。このルーチンがループングさせて途切れなく 3次元 AR マーカ+がトラッキングされることを想定する。

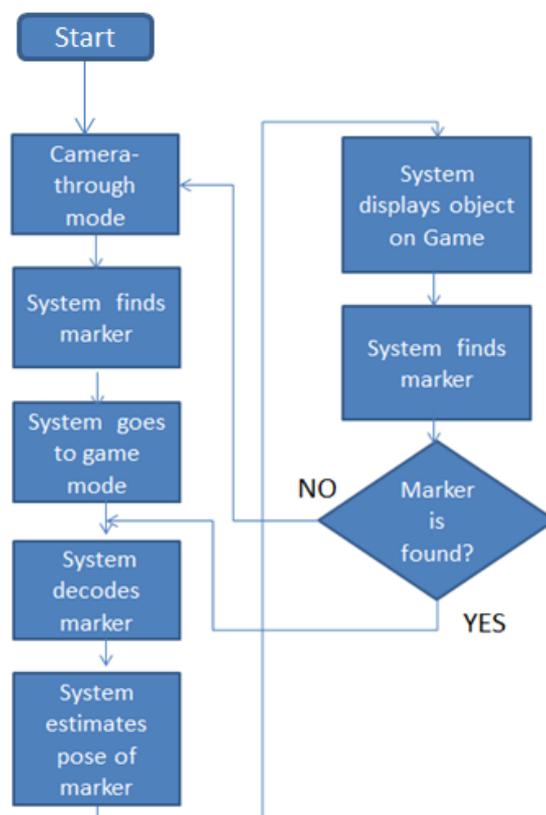


図 5.3-6 システム動作フロー

5.4 実験

本節では、3次元ARマーカと3次元ARマーカ+を同条件でCV認識し背景色が及ぼす影響について比較し、3次元ARマーカ+の有効性を検証する。

5.4.1 実験装置

図[5.4-1]の実験システムで実験と評価を行う。Samsung Galaxy S4 Android スマートフォンにCBデコードソフトウェアを実装し、マーカを回転させながらCV認識の継続性と背景色による影響に関して評価を行う。マーカはスマートフォンから300mmの距離に設置し360度回転できるようにした。マーカがスマートフォンカメラで撮像された後、デコードされマーカ認識が成立したとき、マーカの周囲に赤い枠がスマートフォンのディスプレイパネルに描画されるようにソフトウェアをプログラムした。



図 5.4-1 実験システム

5.4.2 実験結果

図[5.4-2]では、4章で詳述した、3次元ARマーカをスマートフォンとソフトウェアを使ってマーカのCV認識を行ったスクリーンショットを示す。通常の蛍光灯下における、実験室の天井を背景にした場合、天井色が白に近い無彩色であるため安定してマーカ認識ができることを確認した。CBの周辺に赤枠がオーバーレイ表示されていることからCBの認識が成立していることが分かる。

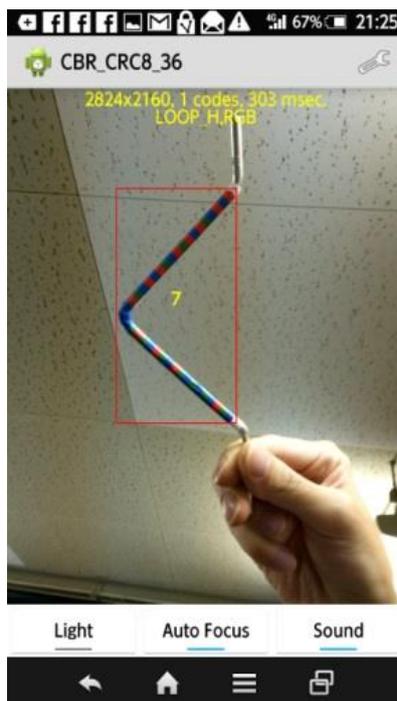


図 5.4-2 無彩色背景での 3 次元 AR マーカの認識

図[5.4-3]のスクリーンショットは、背景に無彩色である白い紙を置いて、3次元ARマーカと3次元ARマーカ+の認識状態を比較した結果を示す。どちらも、安定して認識できることが確認できた。

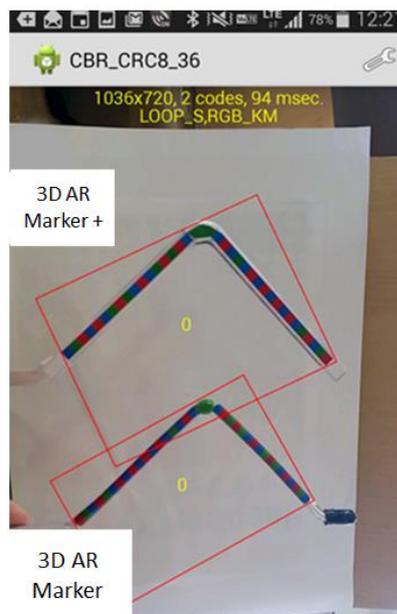


図 5.4-3 無彩色背景における認識の比較実験

図[5.4-4]では、色彩豊かな本を背景に3次元ARマーカと、3次元ARマーカ+をCV認識させようと試みた結果、クワイエットゾーンをCBの周囲に配置した3次元ARマーカ+においては安定して認識ができたが、3次元ARマーカでは背景色の影響から認識が不安定になることを確認した。

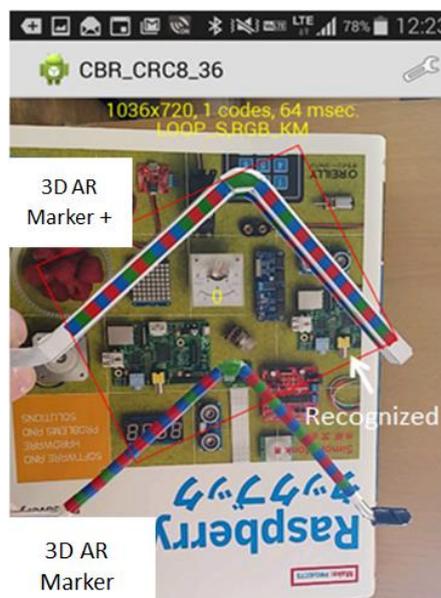


図 5.4-4 有彩色背景における認識の比較実験

図[5.4-1]の実験装置における回転テーブルに3次元ARマーカ+を装着し、背景には有彩色の本を置いた状況でマーカが360度方向に角度変化するように回転させたところ、マーカは安定して継続認識されることが確認された。3次元ARマーカ+は前述のとおり、4つのCBで構成されるが、認識のとき回転角度により、1個または2個のマーカが認識されて360度回転させたときでもシームレスにマーカ認識が継続できることをスマートフォンの画面で目視確認した。

さらに3章の3次元姿勢推定の方式と同様にOpenCVから出力される測定値の誤差を100回サンプリングした平均値を測定した。マーカを装着する回転テーブルは、4章で使用した図[4.4-1]と同じ装置を使用する。図[5.4-5]では、横軸に回転テーブルの360度回転角度、縦軸はY軸回転方向の物理的実測角度と実装したソフトウェアが出力した角度値との誤差を示した。回転角度に関して基準とする物理的回転角度と、CV認識によりソフトウェアが出力した数値の誤差は、3次元ARマーカが最大7.3%、3次元ARマーカ+が最大9.2%であった。

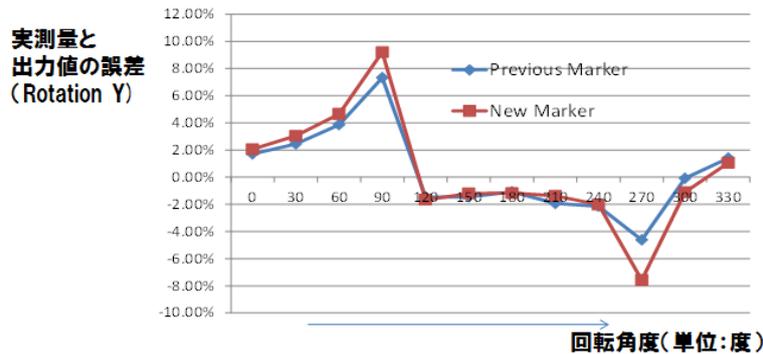


図 5.4-5 Y 軸回転方向の視覚認識の誤差

どちらのマーカも 90 度付近と 270 度付近での誤差が大きい傾向がみられたが、3 次元 AR マーカ+の誤差がやや大きい傾向にあることが確認された。3 次元 AR マーカ+場合、回転角度により 2 個の CB が認識され、その平均値をとっているが、90 度、270 度付近では 1 個しか認識されていないにも関わらず誤差傾向は同様に大きいことから、3 次元 AR マーカ+が複数 CB で構成されることに起因して誤差が大きい傾向にあるとは考えにくい。

5.5 まとめ

本章では、VOIT 実現の技術要素として「幾何学的整合」に関連してマーカの環境色依存問題を解決することを目的としてマーカの使用環境における背景色対応を行った。手の動きをハンドルに装着された 3 次元マーカをスマートフォンのカメラで視覚認識しトラッキングすることで、ヒューマンインタラクションをとまなう VR アクションゲームのような適用を想定した。提案した VR ゲームは持ち運びに便利なスマートフォン、紙とプラスチックレンズで作られた簡易 VR ゴーグルおよび 3 次元 AR+マーカが装着された電子制御不要のハンドルといったコンシューマグレードの装置のみで構成されることからモバイルシーンや家庭などで手軽に使えるシステムである。そのため、環境依存性が低く多様な場所での使用性が望まれる。

一方、第 4 章で論述した 3 次元 AR マーカは、視覚認識されるために背景色に限定があり幅広い環境での使用には問題が発生しうる。そこで背景色依存度の問題を解決するために 3 次元マーカ+を開発して各種実験により有効性を確認した。第 4 章で論述した 3 次元 AR マーカと、本章での 3 次元 AR マーカの比較を表[5.5-1]に示すこの成果によりマーカの背景に有彩色が混じる一般的な環境での動作が可能になり、ゲームが動作する環境領域を格段に広げることに成功した。効果として多様な環境での動

作性を実証したことにより，一般社会において VR ゲーム普及加速への貢献が期待できると考える。

表 5.5-1 3次元 AR マーカと 3次元 AR マーカ+の比較

要件	方式	4象限マトリクスとの対応	新開発マーカ		
			L字型2次元 マーカ	3次元ARマーカ (円柱型)	3次元ARマーカ+ (四角柱型)
3次元姿勢推定		3	◎	◎	◎
特定物体の区別		3	◎	◎	◎
形状自由度性		1, 3	◎	◎	◎
動的歪み耐性		1, 2	◎	◎	◎
認識方向自由度		4	△	◎	◎
背景環境依存性		3	○	△	◎



第6章 VOITによる視覚と力覚の整合

本章では、VOIT 開発のため要件技術として図[6.1-1]の技術要件マトリクスチャートの1象限に分類された「視覚と力覚の整合」において、動的歪みの認識および反力の発生について論述する。前章までの2, 3, 4象限に分類し、実験・評価した技術を活用して、CV 認識により人が実体物とのインタラクション時に反力を発生させながら柔軟物に対する力覚と姿勢を CV 認識により同時に推定し、視覚と力覚の整合をおこなうための技術である VOIT の開発について論じる。

図[6.1-1]において本章で対応する技術要件は太字で表し赤枠で示した。青矢印で関係性を示す通り、前章までの成果を活用して1象限の技術要件を満たすものとする。

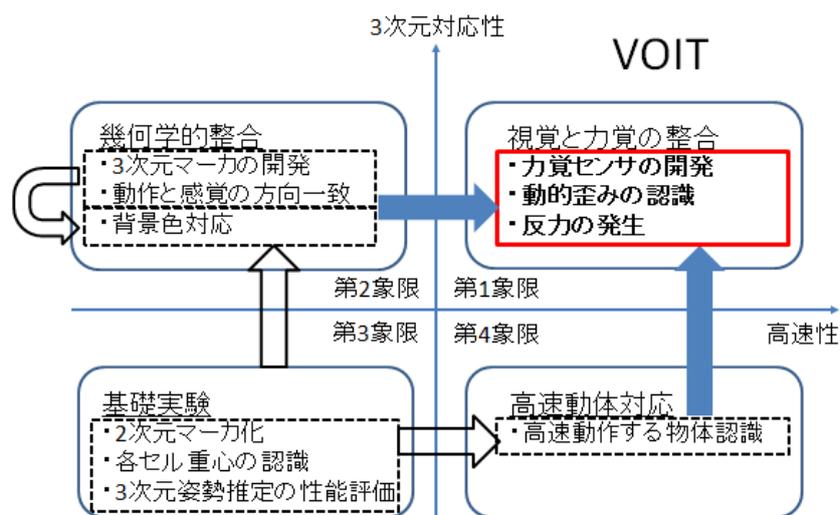


図 6.1-1 6章における技術要件マトリクスチャート

6.1 はじめに

実体物とのインタラクションの観点から、形状自由度を有するマーカの特性を活用しマーカが3次元方向に歪曲しても認識が継続される特徴に着目した。指で押し込まれた柔軟物周辺の歪曲度合いをマーカの位置変位として測定し、力覚推定値としてコンピュータにフィードバックする方式を検討した。そこで PFS と命名する力覚センサを開発し、人が力覚をともなう実体物とのインタラクションにおいて反力を感じながら力覚量に相当する数値を得るための実験、実装と評価を行った。人が反力をともな

って柔軟物を押し込むときの力覚推定を行い、その数値をバーチャル映像における視覚に同調して反映することで、視覚と力覚の整合を試る。効果として HMD 上のバーチャル映像の変化と人の感じる反力が整合することで違和感が縮小し、MR の臨場感向上を目指す。

本方式ではセンシングデバイスは1つのカメラのみであることからスマートフォンにソフトウェアを実装しコンシューマグレードの装置を用いて検証を行い、家庭用やモバイル用途でも活用可能なことを実証した。

VR の技術がゲームを中心に教育や観光などの分野でも導入が進み、新しいサービスが続々と登場しており市場も飛躍的に拡大すると予測されている。PC ベースの VR システムである Oculus Rift や HTC VIVE[95][96]が本格的に実用化され、コンソールゲーム機としては、PlayStation VR が発売され高度な VR 表現が可能になってきた。

また一方で Google Cardboard に代表されるスマートフォンを HMD に装着して使う簡易型 HMD 方式の登場で、身近にあるデバイスを活用して手軽にシステム構築できるようになってきたことから家庭やモバイルで使用するコンシューマ利用においても容易に VR 体験可能な環境が整ってきた。これまで VR システムは HMD のヘッドトラッキング情報を映像にフィードバックする方式が普及し、視覚に対するコンテンツ表現が先行して実用化されてきた。

HMD 上のコンテンツを体験するとき、あたかも目の前に存在するように感じられる映像上の物体に対し、触る、押す、掴むといった力覚をともなうインタラクションの欲求発生は人の自然な反応とみられるため、それらが実装されることでゲームコンテンツなどの臨場感が高まると考えられる。しかし視覚表現に比べて実体物との力覚インタラクションは実用化が遅れていることが認識されている。そこで実体物と、それに重ね合された映像上の物体とのインタラクション結果を VR システムにフィードバックするためには力覚を伝える物理的インタフェース手段が必要と考えられる。

人気ある VR コンテンツの1つとしてホラーゲームが存在する。VR ホラーゲームは人が HMD を装着して体験する際、人に恐怖感を与える仕掛けを 360 度全方位の映像に施すことが可能なことから、仕掛けに人が対峙するときヘッドトラッキング情報を 360 度映像に活用できる点において VR に適したコンテンツである。HMD に装着されたスマートフォンのカメラで指先に装着した AR マーカの認識を行い、ジェスチ

ャをトラッキングしながらシステムへフィードバックする方式の実施例がある (BotsNew VR) [97].

ジェスチャによりゲーム上の映像とインタラクションしながらゾンビとの戦いや、生死の区別がつかない臥位状態の人をジェスチャで押したり触れたりすることでゲームが進行する。このとき、指で押すアクションにともない AR マーカの視覚認識で動きが反映されたとしても、ジェスチャだけでは実体物とのインタラクションのような反力が感じられないため違和感が発生する。

上述したホラーゲーム例においては、反力を発生させる物体は人やゾンビであるが実世界に存在する物体の形状や硬さは様々であり、着衣、ゴム、スポンジ素材などは柔らかい物体（柔軟物）が多種多様に存在する。対象が剛性を有する物体（剛体）の場合、動的に形状が変化しないため物体の視覚認識は AR マーカ装着の従来手法で実現されるが柔軟物の場合、形状が動的に変化するため特定物体を形状だけから認識し続けることは容易ではない。

そこで指を柔軟物に押し込んだとき、形状が動的に変化した場合でも CV 認識を継続させるため 3 章で詳述された形状自由度特性を有するマーカを利用する。4 章で 3 次元対応が確認されたマーカを活用して 3 次元方向に柔軟物が変形する状態の歪曲量から CV 認識により把握できれば、指に反力を感じさせながらマーカの歪曲量に基づいた力覚推定が可能になると考えた。力覚推定値をバーチャル映像にフィードバックし、視覚と力覚の統合がなされることで違和感が縮小し、ゲームコンテンツの臨場感向上が期待できる。

本章では、家庭やモバイルで活用できるコンシューマ向け VR 用途を想定して論述する。人と実体柔軟物とのインタラクション時に、バーチャル映像上での視覚と、反力として感じる力覚の不整合に起因する VR 体験時の違和感縮小を目的とする。目的実現のために力覚センサ PFS を開発し、カメラによる視覚認識で取得された力覚推定値を、VR システムに含まれる描画プログラムへフィードバックすることで、バーチャル映像の変化へ反映する方式の提案および各種実験結果について報告し図[1.1-4]にて「VOIT の概要」で示した視覚と力覚の統合を目的とした VOIT を開発する。

6.2 関連研究

力覚フィードバック手法は、力覚提示装置の開発とともに多数の研究がなされており、ゲームのようなエンタテインメント目的だけでなく、医療、教育など様々で分野にわたっており、柔軟物とのインタフェースに関しても研究がなされている。本節では、方式による分類を行いながら、関連する研究について論述する。

2章にて人の感覚の中で、物を押ししたり引いたりするときの抵抗覚と、物を持つときの重力によって生じる重量覚を、深部圧覚と分類し、深部感覚に能動的に刺激を与えることを力覚提示と定義した。力覚提示と触覚(ハプティクス インタフェース)は、ほぼ同義語として用いられるが、本章では力覚提示と表現する。

2.1.2項にて、力覚提示の従来手法について、道具媒介方式、エグゾスケルトン型、対象指向型という分類および、それらの使用形態として接地型と非接地型に分類されること、および従来研究について詳述したが、いずれも、コンシューマグレードの装置として一般家庭に容易に普及できるものが確立されていない現状がある。一方、昨今、スマートフォンをベースとした簡易的な開発者向け環境が提案されている。

Google社が発表したDaydream [98][99]、図[6.2-1]は、モバイルVR用プラットフォームで、ワイヤレスの専用コントローラが付属され、スマートフォンを内蔵したHMDを装着した没入状態にてVRシステムをボタン、ジョイスティックでコントロールし結果を映像に反映することができる。これは、非接地型に分類され、コントローラ上の物理ボタンの抗力是一種の力覚提示装置といえる。しかしながら、柔軟物の力覚提示とフィードバックには対応していない。

また、従来のARTookKitに代表される2次元ARマーカ方式ではマーカが硬い物体に装着されることしか想定されておらず、形状が動的に変化する柔軟物に対する力覚フィードバックが困難であるため、CV認識の動的な継続性に問題があると考えられる。対象が剛性を有する物体(剛体)の場合、動的に形状が変化しないため物体の視覚認識はARマーカ装着の従来手法で実現されるが柔軟物の場合、形状が動的に変化するため特定物体を形状だけから認識し続けることは容易ではない。



図 6.2-1 Google Daydream

6.3 提案手法

本節では、人の柔軟物との力覚インタラクション結果を PFS で CV 認識し、システムに反映するための力覚フィードバック手法と、それらを実行する VR システムについて提案する。6.1 節で記述したホラーゲームの例のように、人が柔軟物を手に持つ、または把持する状態においてバーチャル映像上の物体に相当する実体柔軟物を押すことで反力を感じる状況を想定する。

柔軟物を押したとき、指から加えられる力に応じて形状が変化する。そこで、押された周辺の形状変化をカメラで視覚認識することで指が柔軟物に対して反力を感じながら、力覚推定ができるのではないかと考えた。本章では、柔軟物に 3 章で検証した L 字型 2 次元マーカ（本章では、以降 L 字マーカと表記）を装着し、マーカをスマートフォンなどのカメラで視覚認識することで、装着されたマーカの歪曲度合いから力覚を推定するためのセンサである PFS を開発し、推定結果をコンピュータの描画プログラムにフィードバックする方式を提案する。なお、本節ではモバイルや家庭用といったコンシューマ用途を想定するため、コンシューマグレードの装置のみでシステム提案を行う。

本章では、人の柔軟物との力覚インタラクション結果を提示し、システムにおけるバーチャル映像に反映するための力覚フィードバック手法と、それらを実行する VR システムについて提案する。6.1 節で記述したホラーゲームの例のように、人が柔軟物を手に持つ、または把持する状態においてバーチャル映像上の物体に相当する実体柔軟物を指で押し込むことにより反力を感じさせる状況を想定する。

柔軟物を押し込んだときに指から加えられる力に応じて形状が変化する。そこで、押し込まれた周辺の形状変化を CV 認識することで指が柔軟物に対して反力を感じながら、力覚推定ができるのではないかと考えた。本章では、柔軟物に形状自由度特性を有するマーカを装着し、マーカをスマートフォンなどのカメラで認識することで装着されたマーカの歪曲度合いから力覚をセンシングして推定する装置を開発する。力覚の推定結果を MR システムに含まれる描画プログラムを経由し、バーチャル映像にフィードバックする方式を提案する。なお、本章ではモバイルや家庭用といったコンシューマ用途を想定するため、コンシューマグレードの装置のみでシステム提案を行う。

本章で使用する用語の説明を下記に示す。

- 「押す力」とは、柔軟物が指で押し込まれたときの力を意味する。(単位: N)
- 「反力」とは、本稿においては、指で柔軟物を押し込んだときに押す力と同時に発生する人の受容感覚を定性的表現として使用するものとする。
- 「押下ストローク」とは、柔軟物が押し込まれた距離の変位を意味する。(単位: mm)

6.3.1 力覚センサで用いる柔軟物の選定

実体物とインタラクションする可能性がある体の部位は手、指、足などに存在する。本研究では使用頻度が高いとみられる手の親指の力覚に着目して提案と実験を行う。

指の力覚インタフェースを実現するための力覚センサに使用する柔軟物の選択条件として、可搬性を考慮して軽いこと、様々な対象柔軟物の形を模して成形するための加工性、指の柔軟物への押す力に対して適度な弾力性を持つこと、およびコンシューマ用途を想定し入手性の容易さを考慮してポリエチレン、ポリウレタン素材のスポンジを候補にあげる。

スポンジを人の親指で押し込む際、親指の形状や大きさには個人差があるので、それを考慮する必要がある。また、指など押し込む側の素材が柔軟性を持つと表面触覚に相当する摩擦の影響が出てくるため、力覚との切り分けが難しくなる。本研究では力覚のみの推定に着目する。そこで、スポンジ（押し込まれる側）と押し込む側の素材の間に発生する摩擦の影響を抑制するために、図[6.3-1]のようにスポンジ上に剛体樹脂素材である円形プラスチック板を装着して測定を行う。圧力 P_a は、数式 1 のように円形面積の 2 乗あたりのニュートン力(N)で現すことができる。

$$P_a = N/m^2 \quad (1)$$

実験の再現性を得るために定型サイズの剛体プラスチック板を使用して、押下ストロークの変化に対する押す力の関係を測定するときの面積を一定にする。指の押し込みにもないスポンジが押し込まれたときの中心における押下ストロークをスケールで測ることで、特定素材における押す力と押下ストローク量の関係を実験で明らかにする。

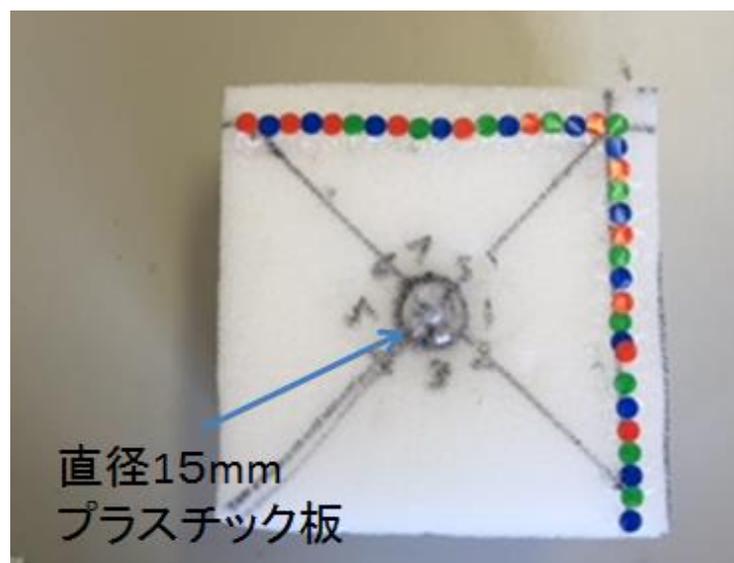


図 6.3-1 スポンジによる力覚センシング

6.3.2 力覚センサの開発における視覚認識マーカ

スポンジが押された周辺の歪曲にともなう形状変化を CV 認識するために、形状自由度特性を持つマーカとして 3 章で実験・評価した L 字マーカの基本設計を活用する。

図[6.3-2]にはスポンジ素材に装着する L 字マーカの設計図を示す。また各セルの大きさを同じにして、スポンジ素材の周辺に並べることにより、手や指でマーカが視覚認識に対して隠れてしまうというオクルージョン問題を小さくできるようにした。CB はデータタグであるため、マーカとして使用されたときでも複数同時に区別して CV 認識することが可能である。さらにデータタグとして付帯情報を紐づけておくことでマーカから力覚センサの各種属性を理解することも可能である。

L 字マーカの周りに多彩な色の印刷がなされていたとしても、条件を満たしてコードとして成立しない場合はマーカとして認識させないため混色して誤読を起す懸念がないのも、この方式の利点と考える。ただし、マーカは他の印刷に対して、クワイエットゾーンと呼ばれる無彩色のエリアを周辺に配置してマーカとそれ以外の色を区別する必要がある。図[6.3-2]においては、各セルの周辺が白色のクワイエットゾーンとして動作する。セルの一部は、エラー訂正ビットとして割り当て、36 個のセルがチェックサムの条件を満たさない限りマーカとして成立しないようにして誤読対策とする。複数セルの集合体を、1 つのマーカとして成立させるため画像上にてマーカが歪曲したとしても CV 認識が成立している限り各セルの変位量計測がマーカ全体の 3 次元姿勢推定と同調して継続できる。

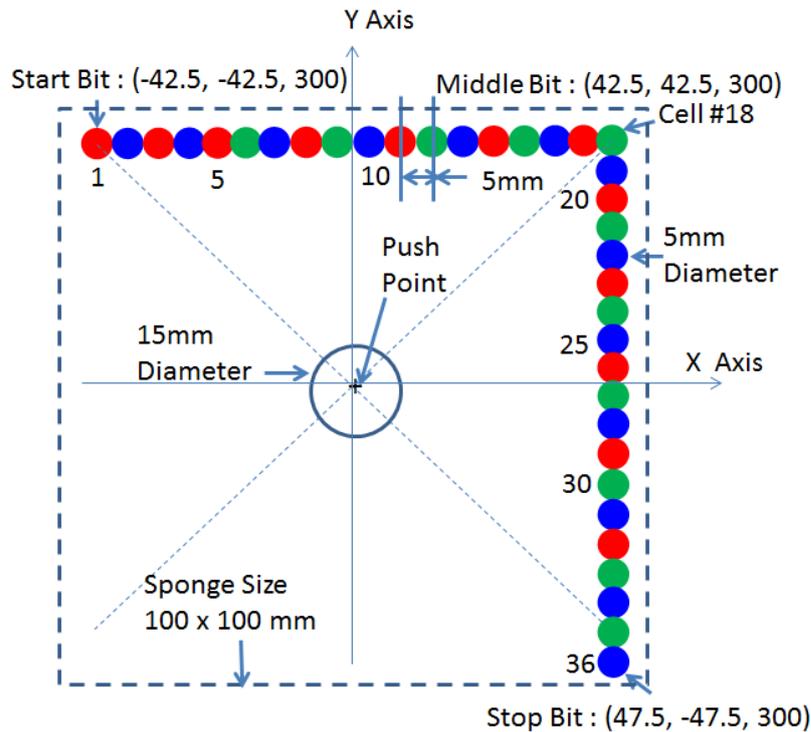


図 6.3-2 L字マーカの設計

6.3.3 力覚センサの提案

6.1 節では、実体物と力覚インタラクションを行うには人との物理的インタフェースが必要であると説明した。このとき実体物と人のインタラクション時に発生する力覚量を能動的に提示する装置は、力覚提示装置と呼ばれる。2章で比較した従来の力覚提示方式は、アクチュエータなど電源が必要な動力を使う方式が主流である。一方、スポンジの弾性を活用して反力を発生させて力覚の推定をおこなう本章の方式は、電子制御をともなわないパッシブ方式による力覚をセンシングする装置として PFS を提案・開発する。2章で記した分類では、対象指向型に分類されるが、接地型および非接地型の両方で使うことが可能である。

スポンジ素材平面に L 字マーカを装着することで、対象指向型の力覚センサ（スポンジ型 PFS）を構成する。指で押し込まれたスポンジ素材の歪曲度合いを、L 字マーカを構成する各セルの位置変位として CV 認識する。スポンジ素材に押し込まれる力によってセルの位置が変位するため、セル位置の変化量を相当する力覚量として表す方式を提案する。

スポンジ型 PFS は、片手でのインタラクションを想定し親指で押し込む動作の容易性を考慮して $100 \times 100 \times 50\text{mm}$ のサイズとし、 $100 \times 100\text{mm}$ のポリウレタンスポンジ平面に L 字マーカに装着する。図[6.3-2]のように L 字マーカを 36 個のセルで構成し、赤、緑、青それぞれのセルサイズは全て直径 5mm の円形とする。 100mm のスポンジ端とマーカの間クワイエットゾーンを設けた。また L 字マーカの 90 度、折れ曲がり部分でセルが衝突して混色しないように円形セルを採用する。

カメラのイメージセンサ表面と正対し、レンズの主点と L 字マーカの中心位置座標が一致する状態を図 [3.2-2]に示す世界座標系にてマーカ全体の回転 Rotation (X, Y, Z), 並進 Translation (X, Y, Z)と定義する。ここでは、スポンジが指の押し込みにより歪曲したときにおけるセル位置の変位測定を想定する。このとき図[6.3-2]において、仮説として指でプッシュポイントを押し込んだとき、36セル中における、セル番号 1, 18, 36 などに比べて、9, 10 付近のセルは Y 軸マイナス方向へ、26, 27 付近のセルは X 軸マイナス方向への位置変位が大きいのではないかと考えた。そこで、指によりスポンジを押し込む前の各セル位置と、押し込んだ後の変位した位置の差を、スマートフォンのカメラに内蔵されるイメージセンサ上におけるピクセル座標の変化として認識し 2 次元平面における各セルの位置変位を観測する。

6.3.4 L 字マーカと CV 認識と 3 次元姿勢推定

36セルで構成される L 字マーカにおける各セルの位置推定と、マーカおよび、マーカが装着されたスポンジ型 PFS (以降、PFS と記述する) の姿勢推定は以下の手順で行う。まず、カメラが L 字マーカを探して認識し、スマートフォンに実装されたデコードソフトウェア (デコーダ) にて L 字マーカを切り出してデコードしたのち、各セルの位置を求めることで、カメライメージセンサ上における、L 字マーカの 3 章で詳述した方法で 3 次元姿勢の推定値および、各セルそれぞれの 2 次元座標値を得る。

デコーダに L 字マーカのセルサイズ、セル数を入力することで各セルの位置座標 (X, Y) 値が返されるようにプログラム実装する。本章の方式では、柔軟物の押下ストロークによる力覚フィードバックに着目して論述するが、PFS をコントローラと見立てるとスポンジ型 PFS 自体の並進と回転の 6 軸姿勢情報の取得も可能である。L 字マーカの場合、図[6.3-2]示す先頭ビットに相当する 1 番セル、L 字型折れ曲がり部分に配置される 18 および、最終ビットの 36 番セルの 3 ポイントの位置が分れば、並進、回転値を取得し、L 字マーカおよびマーカが装着された PFS 自体の 3 次元姿勢推定が可能である。

また、L字マーカは、3章で述べたように、複数同時認識も可能であるため、複数のPFSを、1つのカメラで認識することも可能であり、1人が両手それぞれにPFSを持つ、または、複数人数が持つPFSによる推定結果を同時にCV認識することも可能である。

6.3.5 VRシステムのワークフロー

本章で提案する適用例を図[6.3-3]、システム構成を図[6.3-4]に示す。



図 6.3-3 適用例

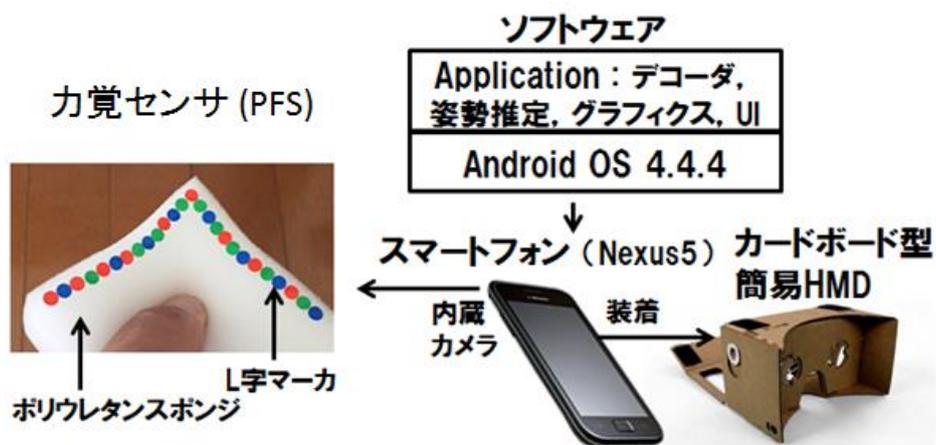


図 6.3-4 システム構成

紙とプラスチックレンズで構成される簡易カードボード型 HMD, カメラを内蔵したスマートフォン, L 字マーカが装着された PFS および実装されたソフトウェアのみで構成される. 次に, VR ゲームシステムでの応用システムフロー例について図[6.3-5]を参照して説明する.

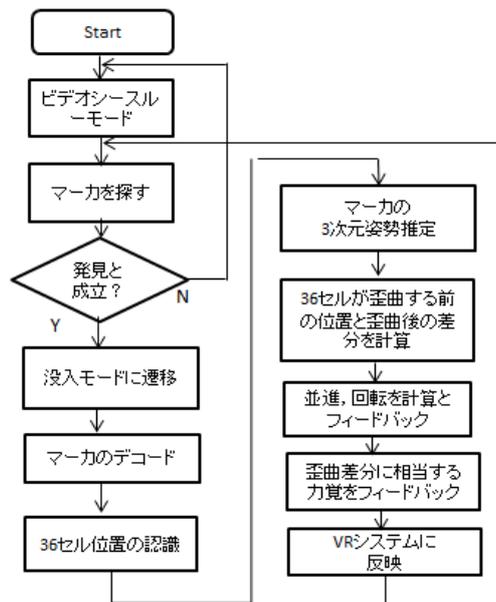


図 6.3-5 システムフロー

VR ゲームは人のアクションをとまなうことが多いが, 特殊な状況を除くと, 安全性に配慮して椅子に座った状態での使用が推奨される. 没入状態では現実世界に存在する実体物を視認することができないため, 実際のゲームをスタートする前に, カメラをビデオシースルーモードにセットし HMD 装着時に現実世界が視認できるようにする. 次に, PFS 上の L 字マーカが, 実装されたソフトウェアで認識された時点で没入モードに遷移し, マーカのデコードが行われると同時にマーカにおける 36 個の各セル位置を推定する. 次に, L 字マーカの先頭である 1 番セル, マーカの折れ曲がり地点の 18 番セル, 後端である 36 番セルの 3 セル重心から OpenCV の関数を用いてマーカの並進, 回転値を計算し PFS 全体の 3 次元姿勢推定を行うことで, 柔軟物に重ねあわせて HMD 上にバーチャル映像を表示するためにカメラとマーカの位置関係を表す 3 次元姿勢情報を取得する. また, PFS の中心を指で押し込んだとき, スポ

ンジの歪曲にともなう 36 個のセル重心を X, Y 座標値の変化として取得し, 変化量を力覚推定値としてユークリッド距離に変換する. 押下ストローク量とセル位置変位量の関係は柔軟物の素材に依存するため事前に計測しておくものとする. L 字マークは 3.2 節で説明したとおり, データタグの要素を有するため PFS の素材に応じた属性情報を事前にコンピュータに記憶しておくことで, セル配列情報から PFS の区別と属性情報の紐付けを可能とする.

PFS の 3 次元姿勢を理解させるために回転と並進値, およびユークリッド距離で表現される力覚推定値を VR システムのコンピュータ内に実装される描画プログラムにフィードバックする. 描画プログラムは HMD 上のバーチャル映像に姿勢と力覚推定の変化を反映する.

VR システムでの描画処理後, 図[6.3-5]のルーチンがルーピングされて途切れなく L 字マークが認識されるようにする. L 字マークがカメラ認識範囲から外れたとき, 没入状態からビデオシースルーモードに遷移するようにする.

体験者は PFS (この場合スポンジにマークを装着した実体物) を押し込むとき反力を感じる. 同時に HMD に装着されたスマートフォンのディスプレイパネルに描画されるバーチャル映像が歪曲する動きとして視覚で受容されるため, 視覚と力覚の整合により違和感の縮小がもたらされ VR システムの臨場感向上効果が見込まれる. このシステムでは, 実空間における柔軟物の姿勢推定と, 柔軟物を指で押し込んだときの反力に相当する力覚推定値が 1 個のカメラで認識されるため, 姿勢と力覚の認識が同調して行われることも特徴である.

6.4 実験

本節では, まず柔軟物として使用するスポンジ素材を検証し選択する. L 字マークをスポンジに装着し, 指でスポンジを押し込んだときの押下ストロークにともなうマークの歪曲度合いを, マークを構成する 36 個のセルの位置変化として計測する. 柔軟物に対する視覚認識方式で力覚推定が行われ, 力覚フィードバックが可能なことを確認する.

L 字マークが歪曲していないときにおける 3 次元姿勢を 3 章で述べた手法により取得し, 姿勢推定値を実験時における PFS をカメラのイメージセンサと正対させるための位置調整に利用する.

6.4.1 PFS としてのスポンジ弾力特性

指でスポンジを押し込むとき力覚をともなってマーカの歪曲度合いを計測する実験に適した素材を選択する必要がある。そこで実験で使用するための素材を複数検討した。ポリウレタン素材(図[6.4-1]の A)とポリエチレン素材(図[6.4-1]-B)を比較すると、ポリウレタン素材では指の押し込みに柔軟かつ均一に素材が変形しているが、ポリエチレン素材では指の押し込みにともなう均一性が低いことが分ったため本章の実験ではポリウレタン素材を採用し、持ちやすさを考慮して大きさを $100 \times 100 \times 50\text{mm}$ とする。また、また、6.3.1 項で説明したように PFS の中心に押し込む場所（プッシュポイント）としてプラスチック板を装着する。親指の爪の指先方向に平行な 2 分の 1 サイズのポイントで指幅を 10 人計測して平均をとったところ 21.4mm であった。そこで指幅の 70%が押し込みに寄与すると近似して直径 15mm の円形プラスチックを使うことにする。

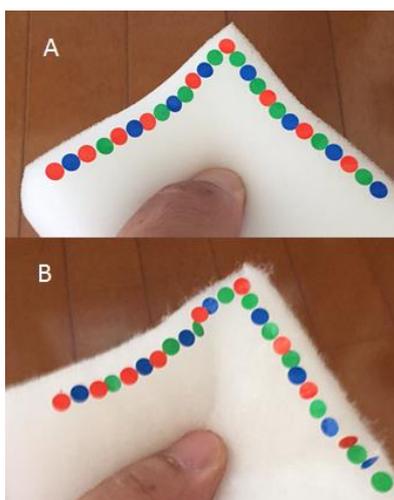


図 6.4-1 ポリウレタンとポリエチレンの比較

スポンジ素材を押し込む力に対する形状変位量を明らかにする目的で、押下ストローク量と押し込み力との関係を計測するために図[6.4-2]の実験装置を用意した。PFS とテクロック社製のテンションゲージ PPN-705-20 を設置して PFS のプッシュポイントを押し込んだときのスポンジ素材の押下ストローク量と押し込み力(N 値)の関係を測定した。プッシュポイントには直径 15mm のプラスチック製の円形板を装着しテンションゲージは円形板の中心を PFS の平面に対してプッシュ装置で鉛直方向に押し込むようにした。5mm 間隔でスポンジを押し込み、そのときのニュートン力(N)値を計測した結果を図[6.4-3]に示す。横軸はスポンジの押し込みにともなう変位量（押下ストロー

ク), 縦軸には押す力を示す. 5 N 程度の力を加えてスポンジが変形し始めることがわかり, その後は, 変形にともなう押下ストローク量に対して, おおよそニアに N 値が変化した. この実験結果から使用したスポンジ素材における, N 力あたりの押下ストローク量が確認できた. なお, ポリウレタンスポンジ素材は, イノアックコーポレーション社製, 商品名は, カラーフォーム ECZ, CAS No. 9009-54-5 を使用した.

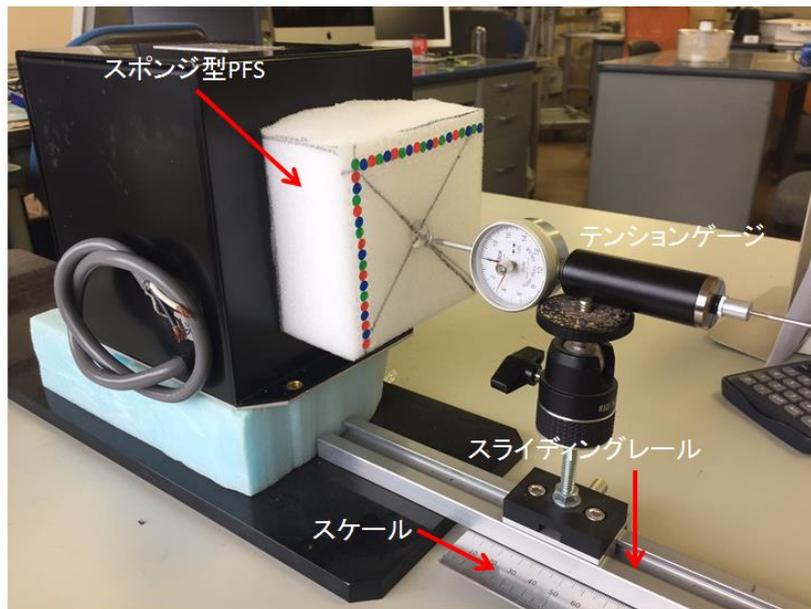


図 6.4-2 スポンジ柔軟度の測定系

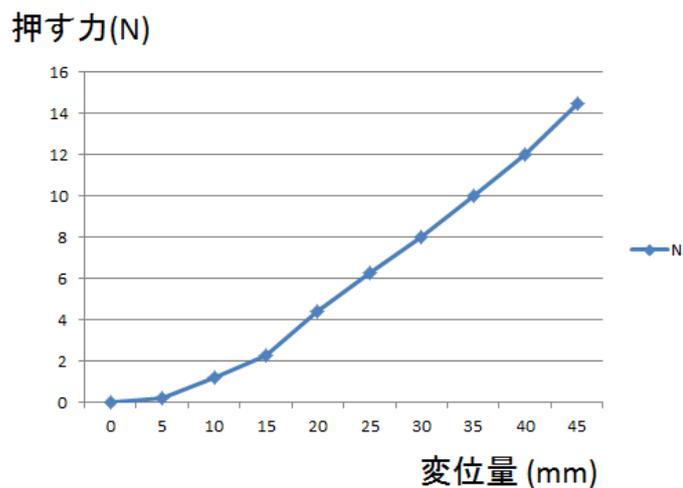


図 6.4-3 押す力とスポンジ変位量の関係

6.4.2 PFS 歪曲度合いの CV 認識

PFS が指で押し込まれたときの歪曲度合いを L 字マーカの構成要素である 36 個セルの位置変位から推定する目的で図[6.4-4]の実験装置を用意した。押下ストローク量にともなう各セルの X, Y 方向の位置変位を測定した。実験装置では Nexus5 スマートフォンを装着し実験台に固定することで世界座標系においてマーカの姿勢が並進 $(0,0,300)$, 回転 $(0,0,0)$ になるように調整した。並進 Z 値の示す 300 はマーカが歪曲していない状態にてマーカとカメラの距離が 300mm であることを示す。スマートフォンのカメラ画角を図 [3.3-2]に示すピンホールカメラモデルで推定したところ水平 58 度, 垂直 36 度であった。カメラのピクセル数は水平 1280, 垂直 720 に設定した。このとき, 1 ピクセルあたりの分解能はピンホールカメラモデルを用いて水平 0.25mm, 垂直 0.27mm と計算される。

図[6.4-4]の実験装置に装着されたスケールで押下ストローク量を測り, カメラで L 字マーカを視覚認識しデコーダおよび OpenCV を含め, スマートフォンに実装したソフトウェアにて各 36 セルの位置変位量を測定した。

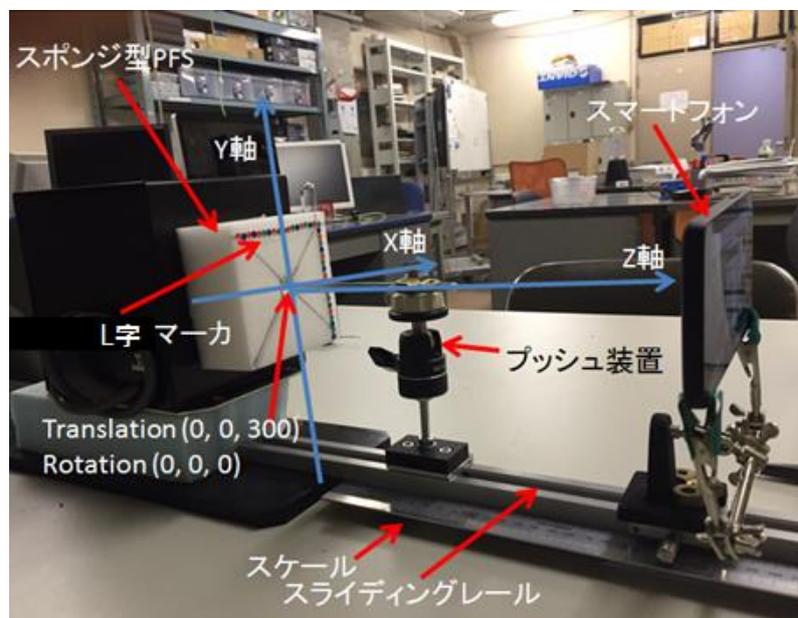


図 6.4-4 セル位置変位の測定装置

図[6.4-5]に示すスマートフォンのスクリーンショットは、押下ストローク 0mm 時の状態である。

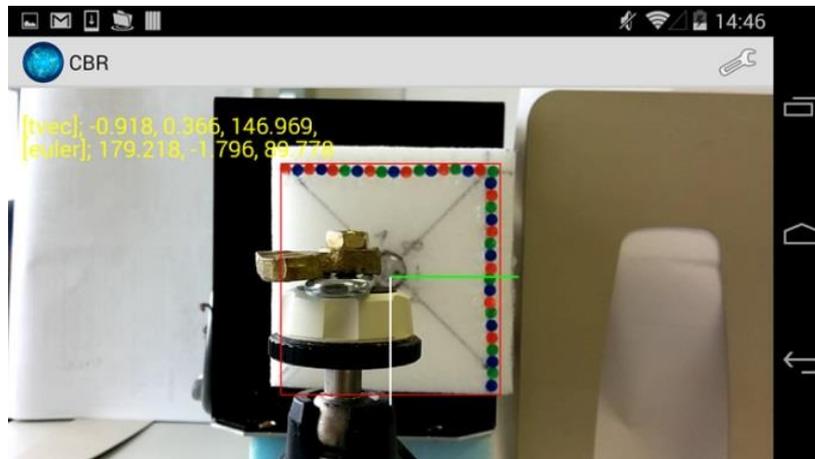


図 6.4-5 変位量 0mm のとき (歪曲無し)

次に、5mm 毎に 35mm まで 36 セルの X, Y 方向における位置変位量を測定した。図[6.4-6]に押下ストローク 35mm のスクリーンショットを示す。スポンジの周辺にグラフィクス表示した赤い枠線は、CB 成立条件を満たし L 字マーカとして成立したときに表示されるようにプログラムした。また、世界座標におけるセンター位置を示すために黄色と緑色で構成される L 字型のグラフィクスも同時に表示した。

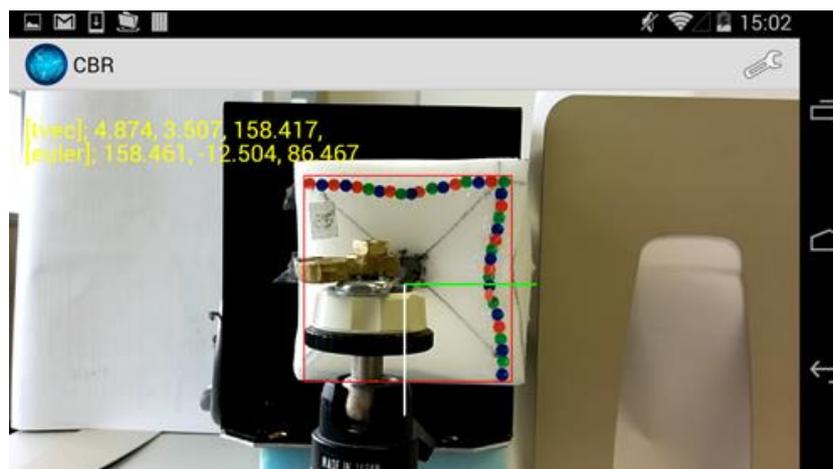


図 6.4-6 変位量 35mm のとき (歪曲有り)

図[6.4-5]と図[6.4-6]を比較すると 35mm ではスポンジに加えられた力から L 字マークに明らかな歪曲が確認された。

6.4.3 セル位置変位量の測定結果

スポンジの歪曲量と押す力の相関を評価する目的で 36 セルそれぞれの X, Y 方向の位置変位量の測定を行った結果を図[6.4-7]に X 軸方向, 図[6.4-8]に Y 軸方向として示す。押す力と押下ストローク量は図[6.4-3]の実験結果から 5N 以上で比例するものとして近似する。

横軸は左から順番にセルの番号を示す。1 から 18 番セルまでは X 軸と平行にセルが並んでおり、19 から 36 番セルまでは Y 軸と平行にセルが並んでいるため、18 と 19 番セルの間で L 字マークが 90 度折れ曲がる。縦軸には 5mm 単位で押下ストロークを変化させながら PFS を押し込んだときのセルの位置変位量を表す。

図[6.4-7]の結果から 19 から 36 番セルの間において 26 番セル付近に極小値が観測された。これは、19 から 36 番セルが Y 軸と平行に配列されているため X 軸方向の位置変位が顕著にみられたものと考えられる。押下ストローク量が、10mm までは明確な位置変位が観測されないが 15 から 35mm では押下ストロークに相当する押す力と位置変位量に明確な相関がみられた。相関がみられた押下ストローク範囲である 20mm を有効領域とすると、視覚認識の最小計測限界が 0.25mm(水平)であることから、分解能は 80 段階あることが分かる。また、1 番セル付近においても位置変位が観測された。1 番セルが X 軸方向に位置変位しているのは 1 と 18 番セルの間隔が縮小しているとみられ、0 と 35mm の押下ストロークにともなう位置変位を比較すると 35mm の押下ストローク時に 0.48mm 縮小しており 0.53%の変化量であった。

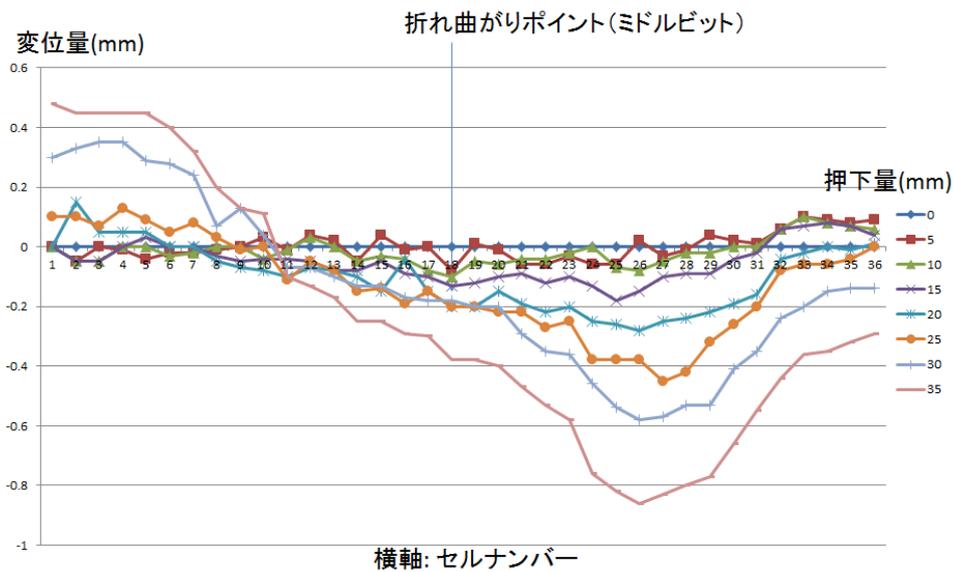


図 6.4-7 X 軸方向のセル位置変位量

図[6.4-8]の結果に着目すると1から18番セルの間において、9番セル近辺に極小値が観測された。これは1から18番セルがX軸と平行に配列されているためY軸方向の位置変位が明確にみられたものと考えられる。ストローク量が20mmまでは明確な位置変位が観測されないが25から35mmでは押下ストロークに相当する押し力と、位置変位量に相関がみられる。相関がみられる押下ストローク範囲である10mmを有効領域とすると視覚認識の最小計測限界が0.27mm(垂直)であることから分解能は37段階あることがわかった。また、36番セル付近においても位置変位が観測された。36番セルがY軸方向に変位しているのは19と36番セルの間隔が縮小しているとみられ0と35mmの押下ストロークにともなう位置変位を比較すると35mmの押下ストローク時に0.96mm縮小しており1.0%の位置変化量である。

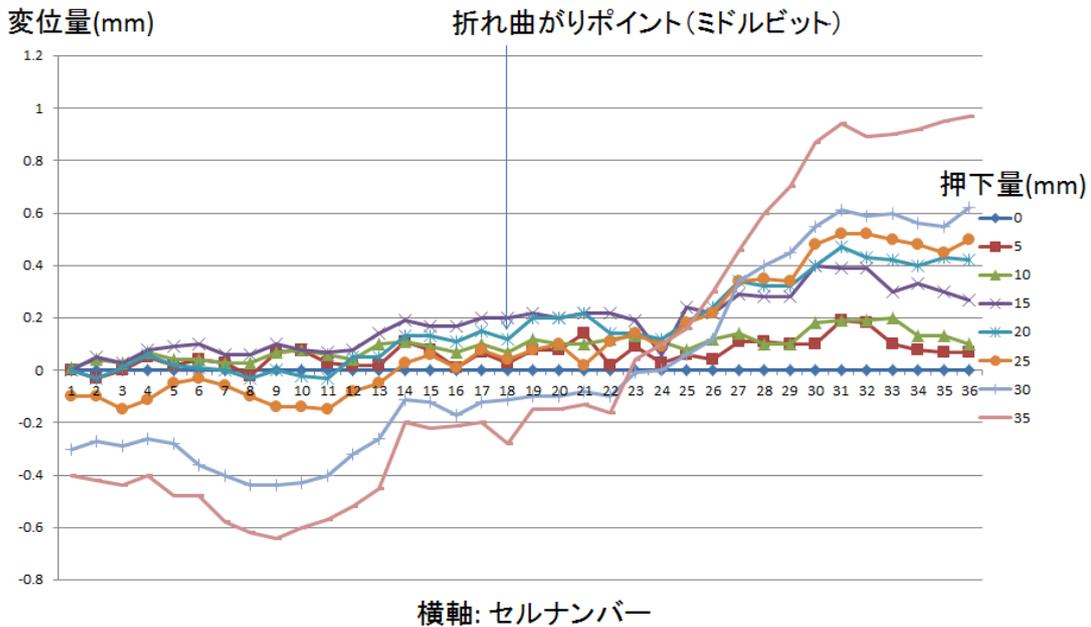


図 6.4-8 Y 軸方向のセル位置変位量

図[6.4-7]と図 6.4-8]を比較して、X 軸と Y 軸における傾向の相違に着目すると X 軸方向の 26 番セル付近よりも Y 軸方向の 9 番セル付近の位置変位が明らかに小さいことが分かる。これは、図[6.4-6]のスクリーンショットを目視することでも確認できる。一方、1 と 36 番セル付近を比較すると、Y 軸方向の変位が大きい。これらの結果から、このスポンジ素材には組成に起因する配向特性や、それにとまなう切り出し方向による歪曲度合いの違いがあるとみられる。

図[6.4-9]では、式 (1) に基づき X,Y 変位量をユークリッド距離で表現した。1 から 18 番に比べて、19 から 36 番セルの方が押下ストロークの有効範囲が明らかに広いことが観測される。このスポンジ材料が Y 軸方向に対して柔軟であると評価された。

$$D_n (P'n, Pn) = \sqrt{(x'_n - x_n)^2 + (y'_n - y_n)^2} \quad (1)$$

D: ユークリッド距離 (mm)

- Pn は変位前, $P'n$ は, 変位後のセル重心を示す.
- n は, セル番号を示す.

本章での実験結果から PFS を視覚認識することで、押し込まれた周辺の歪曲度合いが数値化され、その分解能が求められたため、力覚推定値としてシステムにフィードバックできることが確認された。

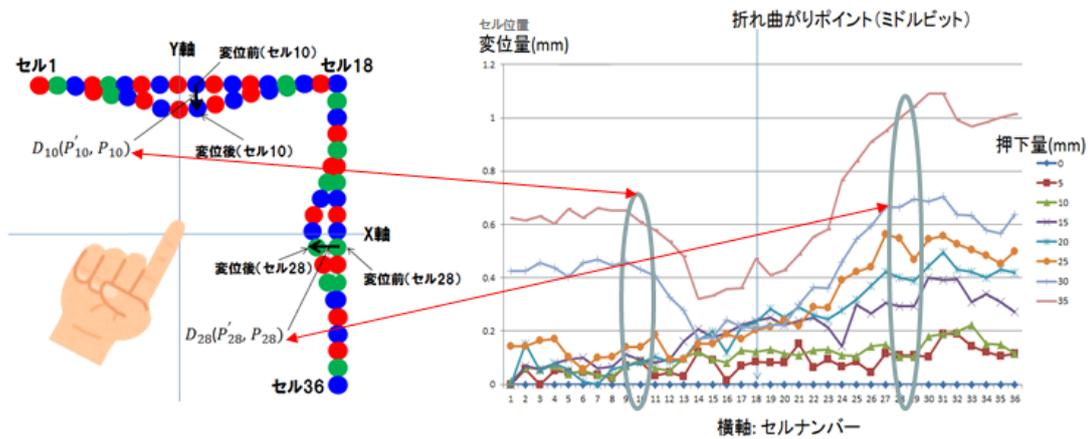


図 6.4-9 ユークリッド距離による評価

6.5 考察

PFS 方式はバッテリーやケーブルが不要、可搬性が高いためモバイル用途に適すると考えられる。また、体に大がかりな装置を着けたり外したりといった負荷や手間がかからないため人へのストレスが低く、一般コンシューマ用途に活用しやすいと考えられる。

PFS のプッシュポイントとして装着されたプラスチック円形板の素材については、人の指の弾力性に近いとされるシリコンやソルボセイン素材[100][101]の採用も考えられるが、押し込む側と押し込まれる側の両方に柔軟素材を使うと、表面触覚に相当する摩擦の影響が出てくるとみられ、押し側の力覚量に特化した推定が難しくなると考えられる。そこで本章では、押し込む側の力覚に着目し、押し込まれる側の柔軟物素材の違いに依存する特性を比較評価することは将来の課題とする。

押し込む側と押し込まれる側の摩擦の影響を抑えるために押し込む側のプッシュポイントには剛体のプラスチック板を使用した。この場合、押し込まれる側の素材が変更されたときでも、押し込む側の力覚推定値を素材ごとに比較しやすいとみられる。

押し込む側の観点においては、より人の指と弾性が近い素材としてシリコンやソルボセインをプッシュポイントの素材に採用する評価も今後必要と考えられるため、将来の研究課題とする。

本章では PFS を押し込むときゲームでの適用として最も使用頻度が高いとみられることから、代表して親指での実験を行った。他の指では形状の違いにより押し込み時の接触面積が異なるため、押下ストロークに対して推定される力覚値も異なることが予想される。今後、他の指への適用を検討する場合、形状の違いに応じて接触面積を考慮する必要がある。このとき、たとえば人差し指で押し込むことが決められている場合は、親指で押されたときと同じ力覚推定値がフィードバックさせるようにキャリブレーションする方式が考えられる。

もう 1 つの考え方として、親指と人差し指で接触面積の相違を事前に理解しておくことにより、押す力を一定にしたときの力覚推定値を比較することで、どの指で押し込まれたかをコンピュータが推定する方法として活用できる可能性がある。

複数本の指の力覚を PFS の活用で推定することは難易度が高いと考えられる。セル位置変位を極めて精緻に認識するためカメラの高解像度性が必要条件であ

り、さらに、機械学習などの手法を用いて大量の押し込みデータを蓄積・分析することで多様なパターンでの指の押し込みに対応できる可能性がある。他の指や複数本の指への適用は将来の研究課題とする。

CV 認識では、一般的にオクルージョン問題が避けられないが、細長くセルを配列できる特徴を有する CB をマーカーとして活用した。PFS の周辺部に L 字形状に細長くセルを配列することでオクルージョンが起こりにくくするよう工夫した。また、複数の PFS を、1 つのカメラから同時に CV 認識できるため、複数人数で PDF を操作しながらゲームを楽しむような用途も想定されることが適用範囲の拡大に貢献できると考えられる。PFS 方式では、バッテリーやケーブルが不要、可搬性が高いためモバイル用途に適し、体に装着する必要がなく脱着が不要なためストレスが少ない方式であるため、一般コンシューマ用途に活用しやすいと考えられる。

また、本方式は、2 次元マーカー使用により PFS の 3 次元姿勢推定も可能にした。実験の際は、マーカーをカメラに正対させる目的で位置合わせのみに 3 次元姿勢推定を活用したが、並進、回転に力覚を加えた 7 軸制御を可能とするコントローラとしても活用が期待できる。

本章では直方体のスポンジ型 PFS を用いたが実世界には様々な形状を持つ柔軟物が存在するので、L 字マーカーの形状自由度特性を活用して、実体物の形態を模した形状で PFS を作成するためにボリューム曲面を有するボール形状、円形物体など異なる形状物体での評価を行うことは今後の課題と考える。100 × 100mm (押し込む面) のスポンジ型 PFS を使用したが、無限大平面に L 字マーカーが装着されたときとスポンジ自体に周辺歪曲がみられる 100 × 100mm サイズでは、マーカー歪曲度合いに違いがみられる可能性が高い。そこで、図[6.5-1]のように 500 × 500 × 50mm サイズの同素材スポンジを用意した。中心には L 字マーカーを装着して 10N (35mm の押下ストロークに相当する力) でスポンジを押し込んだときスポンジ周辺に形状変化はまったくみられなかった。つまり、500 × 500 × 50mm サイズのスポンジではマーカーの歪曲に対して周辺歪曲がみられないため、マーカー装着面は無限大平面とみなすことができる。そこで、厚さ 50mm を一定にして縦横サイズを小さくしながらスポンジを 10N の力で押し込んだときの周辺長さを計測した結果を図[6.5-2]に示す。横軸は PFS のサイズ、縦軸は押し込む前と、押し込んだときのセル位置変位量の差分を示す。

Marker CELL 1-18 は 1 から 18 番セルの中心間長さ、Marker CELL 19-36 は 19 から 36 番セルの中心間長さ。また、セル中心間長さと平行なスポンジ辺の長さを Sponge

CELLとして示す。結果から $260 \times 260\text{mm}$ より小さくなると、セル間長さの縮小にともないスポンジ辺の長さの縮小がみられる。この結果はセル位置の変位量に相当するスポンジを押し力から、スポンジの大きさが、限定された範囲で推定できることを示している。実世界に存在する実体物の大きさは様々である。柔軟物の大きさ情報をVRシステムに反映することで、実体物のサイズをVR映像上の物体サイズとして表示するという新しいコンテンツ表現手法が創出できる可能性を示している。

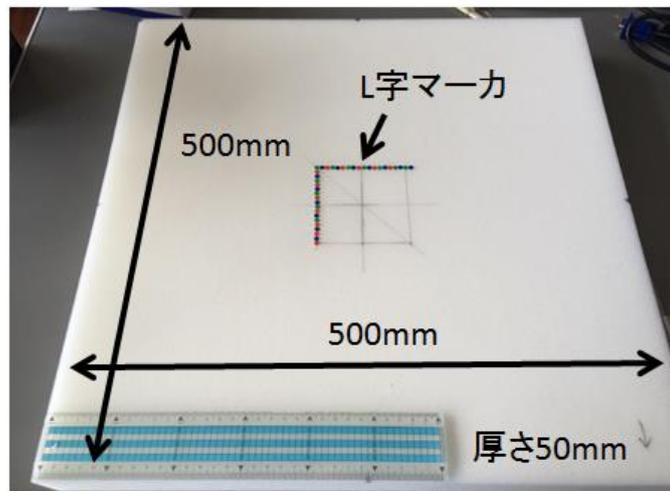


図 6.5-1 無限平面に相当するスポンジ

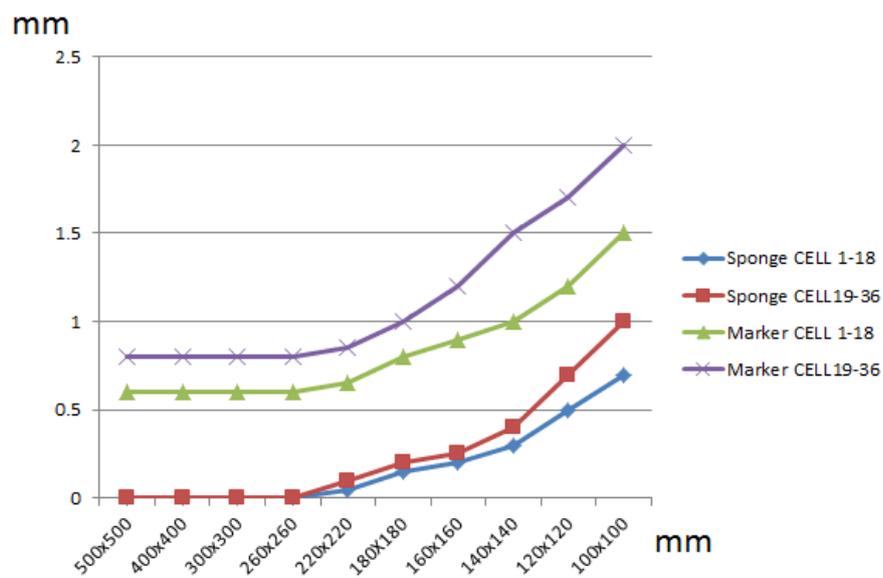


図 6.5-2 スポンジサイズと変位量

6.6 まとめ

人が柔軟物と手や指でインタラクションし、その結果を VR システムなどのコンテンツ表現にフィードバックするとき、反力が感じられないと力覚とバーチャル映像上の視覚が整合されず違和感が発生するという問題に着目した。そこで、2, 3, 4 象限にて検証した技術を活用し VOIT を開発するために、柔軟物を押すとき指が反力を感じながら力覚量を推定するための PFS を試作した。ポリウレタン素材を採用し、指で押す力と押し込まれる量の関係を計測して、形状自由度特性を有するカラービット方式の L 字型 2 次元マーカを装着することで PFS を構成した。指で押し込まれた部分の周辺に発生するスポンジの歪曲度合いをスマートフォン内蔵カメラで視覚認識する手法により力覚量の推定を行う方式を提案した。さらに VR システムへフィードバックする方式とシステムを提案した。

実験により、XY 座標軸における各セルの位置変位量からユークリッド距離を求めることで柔軟物の歪曲度合いを推定し、力覚量に相当する数値を、システムにフィードバックすることが可能なことを確認した。「視覚と力覚の整合」の技術要件と分類された中における、反力の発生と動的歪みへの対応を実現した。

柔軟物を押すときの力覚を推定し、人が物理的反力を感じながら力覚推定値を VR システムなどに反映できることが確認されたので、バーチャル映像に対する視覚と力覚の違和感が縮小し、体験の臨場感向上に貢献するシステムを考案・提案した。

本章では直方体のスポンジ型 PFS を用いたが実世界には様々な形状を持つ柔軟物が存在するので、L 字マーカの形状自由度特性と 3 次元形状対応性を活用して、実体物の形態を模した形状で PFS を作成するためにボリウム曲面を有するボール形状、円形物体など異なる形状物体での評価を行うことは今後の課題と考える。

さらに、将来の課題として、本章で開発した PFS を用いると、VR 用途に限らず、ロボットアーム、義手などが柔軟物とインタラクションを行うときの力覚推定にも応用可能と考えられる。

第7章 結論

MRは期待が大きい技術領域であるが新技術が社会に普及する際、違和感の発生が浸透の妨げになりえる背景を説明した。MR技術は、HMD上のバーチャル映像表示中心に発展してきたが、今後、実世界との関係性、特に実体物とのインタラクションが重要度を増して来ることを見据えて、本研究では「バーチャル映像に対する視覚と実体物に対する力覚の感覚的不整合に起因する違和感を縮小する」という課題を解決するすこことを目的とし、特に期待されるMR技術が社会にシームレスに受容されることへの貢献を成果とする。

そこで、本論文では「バーチャル映像に対する視覚と実体物に対する力覚の感覚的不整合に起因する違和感を縮小する」という課題を解決するための技術として、人と特定物体とのインタラクション状態を認識するためのマーカと認識技術に関する研究を実施し、以下の結論を得た。

実物体と人とのインタラクションの状態を認識・推定する技術としてVOIT (Visual Object-Interaction Technique)を提案し、新規開発したL字型3次元マーカを柔軟物に装着した力覚センサ (PFS)を開発した。VOITは実体物を模したPFS上のマーカ歪み量からインタラクションにともなう3次元姿勢推定及びPFSを押し込んだときの反力にともなう力覚の推定を1つのカメラによるCV認識するという新しい着想による方式を提案できた。

提案したMRシステムは実体物とインタラクションするとき、ヘッドマウントディスプレイ(HMD)上のバーチャル映像表現に対する視覚と実体物を押したときに感じられる力覚の同時知覚を実現する。その結果、バーチャル世界に力覚を与えることから視覚と力覚の整合による違和感縮小の効果を実現できた。ひいては臨場感拡大の可能性を示した。

研究成果のまとめを以下に示す。

第1章「序論」では、研究の背景と目的、創出する世界について論じた。VOITの提案をおこない技術の確立に必要な要件を、2軸4象限のマトリクスチャートに分類・俯瞰して研究方針を明確化することで論文構成を説明した。

第2章「関連技術分野の分析」では実体物のコンピュータビジョンによる認識技術および力覚提示技術に関する従来技術を分析し、本研究で活用するマーカ方式の技術優位性を検証した。

VOIT 実現に必要な「特定物体の CV 認識および動的形状変化の認識による力覚推定のために最適なビジョンマーカとしてカラービット方式」の採用を結論づけた。

第3章「基礎実験」では、形状自由度性を有する1次元データタグである直線型カラービットを90度L字型に変形させてL字型2次元マーカを構成した場合において「3次元姿勢推定が可能であること」、また、マーカを構成する「36個のセルが、それぞれ CV 認識されてセル位置変位量が取得できること」を確認した。

実験により回転方向では $\pm 1.3\%$ 以内、並進方向においては $\pm 4.3\%$ 以内の3次元姿勢推定の精度が得られた。また、36個のセル重心が、それぞれ認識されたことから、マーカの歪みによりセル位置が変位したときの変位量が確認できたためL字型2次元マーカが歪み量測定に有用であることを実証した。以上の結果から、カラービットをL字型90度に変形させて開発したL字型2次元マーカが4章以降で物体とのインタラクションを認識する際に、物体の3次元姿勢推定性能と、歪み量測定に有効であることを確認した。

第4章「幾何学的整合と高速動作物体への対応」では、第3章で有効性が確認されたL字型2次元マーカをL字型円柱形に変形させて「L字型3次元マーカ(応用名称:3次元ARマーカ)」を新規開発した。

従来方式のARマーカでは回転方向でCV認識が途切れる問題があったが、L字型3次元マーカでは、360度回転方向からシームレスにCV認識可能なことを実証した。その結果、物体とインタラクションするときの人の感覚整合に重要な幾何学的整合性を高めることができた。

物体とのインタラクションでは人の手などの動きに相当する高速なCV認識を継続できることの必要性を説明した。そのとき、従来マーカ方式では、カメラのイメージセンサに起因する画像歪み現象(RS歪み)が発生したとき、マーカが歪んで撮像されるためマーカとして認識できなくなる問題があった。物体の高速動作によりカメラのイメージセンサに起因する顕著なRS歪みが発生した場合における物体認識継続性を実験により検証した。その結果、回転テーブルを使用した実験により60-RPMで顕

著な画像歪みが生じた場合でも L字型 3次元マーカの CV 認識継続が可能なことを実証し、必要な高速動体対応を確認した。VOIT ではマーカが装着された柔軟物の物理的な歪み量を計測する必要があるが、高速動作状況を含めて、まず、マーカが認識されることが優先事項である。一旦、マーカが認識できた場合、RS 歪みは補正可能であり、指で押し込まれたような物理的な歪みと区別して認識できることを説明した。対象物体が柔軟物である場合、それを押し込んだとき物体は 2次元平面から 3次元形状の変化として CV 認識されなければならない。本章の成果から L字型 3次元マーカの CV 認識性が確認されたため、VOIT で必要とされる物体インタラクション時における、3次元形状の動的歪みをとまなう物体の形状変化として「3次元対応性」を確立した。

第 5 章「背景色対応による使用環境の拡大」では、使用環境を拡大する目的から第 4 章で論述した 3次元 AR マーカの形状を「L字型四角柱に変形した 3次元 AR マーカ+（応用名称）」を新規開発した。

3次元 AR マーカでは、背景色が有彩色の場合、背景との色分離が出来ない状況に陥ったとき認識が不安定になる現象がみられた。そこで四角柱を 90度 L字型に変形した 3次元 AR マーカ+では、4個のカラービットを四角柱の 4平面に装着することで、カラービット間にクワイエットゾーンと呼ばれる無彩色領域を設けることで、有彩色背景との分離された認識を実験にて実証した。実験の結果、3次元 AR マーカ+の回転角度に関する CV 認識による誤差は最大 9.2%を達成した。360度回転方向から、有彩色背景であっても安定した CV 認識が可能になったため「背景色依存性問題を解決し使用環境の拡大」を実現した。

第 6 章「VOIT による視覚と力覚の整合」視覚と力覚の整合する MR システムの提案を行い第 5 章までの技術を統合する VOIT の開発と評価を行った。

視覚と力覚の整合からの MR システムにおける違和感縮小を目的として、実体物とのインタラクションに「反力を発生させながら柔軟物に対する力覚、姿勢推定を同時に行うための力覚センサ(PFS)」を開発した。PFS を利用して人の指による柔軟物への押し込みによる反力を PFS により発生しながら、同時に PFS が提示する「マーカの 36 個のセルそれぞれの位置変位量および柔軟物の 3次元姿勢を 1つのカメラによる CV 認識する技術」として VOIT を開発した。力覚推定値は XY 軸のユークリッド距離に変換して表現する方式を考案し、その実験結果から PFS と CV 認識を使った力

覚推定の分解能は X 軸方向で 80 段階、Y 軸方向で 37 段階あることを確認した。この実験結果から提案した MR システムにおいて、VOIT により推定された力覚値および、柔軟物の 3 次元姿勢をコンピュータの描画プログラムにフィードバックすることで力覚や姿勢変化に応じてバーチャル映像が同調して変化する方式として示すことができた。

結論として、MR システムにおける実体物に重畳してグラフィクス表示されるバーチャル映像（視覚への刺激）と、実体物が押し込まれたことに起因するグラフィクスの歪みと手の操作による物体姿勢の変化がバーチャル映像に同調して反映され、それと同時に押し込み時に指に対する反力（力覚への刺激）が発生する結果、視覚と力覚が同時に刺激されるため MR システムにおける、視覚と力覚の不整合に起因する違和感縮小に対して大きく貢献できる可能性を示した。

本研究の成果は、物体とのインタラクションをとまなう MR 体験における違和感縮小のための技術として、また、コンシューマグレードの装置のみによる実装性から MR が今後、社会へ普及してゆくために VOIT の提案が有効であり、実装可能な技術であることを実証した。その結果、今後の工学及び産業の発展に寄与することが示されたことから VOIT が洗練され、さらなる発展を期待している。

今後の展開として、本研究では柔軟物としてスポンジ素材に限定したが、臨場感の高い力覚体験を提供するには実体物に出来る限り近い感触を有する素材を使用することが求められ、さらなる研究が必要である。多様な素材の柔軟物とのインタラクションを認識するには、機械学習などの手法を用いて大量の押し込みデータを蓄積・分析する手法が考えられる。鉛直方向の押し込みだけでなく押し込み方向に角度をつけることや、押し込みポイントが中心位置以外でのデータ取得を行うことで、より多くの情報をコンピュータにフィードバックすることが可能になるとみられる。

また、MR 領域に限らず、人と物体の精緻なインタラクション情報をコンピュータに伝える技術は重要度を増していくと見られる。本研究の成果により、柔軟物の精緻な操作状況をコンピュータに伝える技術として介護用ロボットアームの制御、ゲーム機のコントローラや、ドローン飛行のコントローラなどへの応用を含めた、物体を介した新しいコンピュータとのインタラクション方式創出への道筋をつけることができたため、本研究の成果を応用した技術を追究してゆきたい。

謝辞

本論文は筆者が神奈川工科大学大学院工学研究科電気電子工学専攻博士後期課程に在籍中の研究成果をまとめたものである。同専攻教授一色正男先生には指導教官として本研究の実施の機会を与えて戴き、その遂行にあたって始終、ご指導を戴いた。ここに深謝の意を表す。創造工学部教授奥村万規子先生、工学部教授武尾英哉先生、情報学部教授松本一教先生、千葉工業大学教授森信一郎先生には、論文審査においてご助言を戴くとともに本論文の明細にわたりご指導を戴いた。ここに深謝の意を表す。創造工学部ホームエレクトロニクス開発学科准教授杉村博先生にはご助言を戴くとともに本論文の明細にわたりご指導を戴いた。ここに深謝の意を表す。同大学院修士課程在学中における、藤崎弘太郎氏、三浦喬平氏には、本研究の実験遂行にあたり多大な協力とご支援を戴いた。ここに感謝の意を表す。

カラービット方式の発明元であるビーコア株式会社の水野廉郎社長、田中葉氏には、研究開始にあたり多大なご助言を戴いた。ここに深謝の意を表す。最後に家族には大学院在学中に多方面で助力を戴いた。ここにあらためて深謝の意を表す。

参考文献

- [1] *IDC VR/AR market Research*. [Online].
<https://www.vrfocus.com/2016/08/the-ar-and-vr-market-is-to-grow-to-over-160-billion-in-the-next-4-years/>, (参照 2016-08-21)
- [2] *Digi-Capital AR/VR Market Research*. [Online].
<http://www.digi-capital.com/news/2015/04/augmentedvirtual-reality-to-hit-150-billion-disrupting-mobile-by-2020/#.WCpf19KLSM8>, (参照 2016-08-21)
- [3] 呉海元. 画像・映像の処理, 認識理解研究の歴史と現状. 和歌山大学. pp.1-46 , 2007
- [4] 金出武雄. コンピュータビジョン. 電子情報通信学会誌. Vol.83, No.1. pp.32-37
- [5] 岩田洋夫. ハプティックインタフェース. 計測と制御. 第 38, 第 6 号, pp.391-396, 1999
- [6] 神原誠之. 基礎 1 : 拡張現実感. 情報処理. Vol.51, No.4. pp.367-372, 2010
- [7] *Google Glass*. [Online]. <https://www.google.com/glass/start/>, (参照 2016-08-21)
- [8] *Ricoh THETA*. [Online]. <https://theta360.com/>, (参照 2016-08-21)
- [9] **H. Kim, T. Campos**. *Room Layout Estimation with Object and Material Attributes Information using a Spherical Camera*. Fourth International Conference on 3D Vision. pp.519–527, 2016
- [10] 曆本純一. 拡張現実感技術の将来展望. 映像メディア学会誌. Vol. 66, No12. pp.1048-1053, 2012
- [11] 廣瀬通孝. 五感情報通信技術. バイオメカニズム学会誌. Vol.31, No.2, pp.71-74, 2007
- [12] *ARToolKit* . [Online]. <http://artoolkit.sourceforge.net/>, (参照 2016-08-21)
- [13] **W. Qin, F. Zhang**. *A New Interaction Method for Augmented Reality Based on ARToolKit*. 8th International Congress on Image and Signal Processing. pp.578-583, 2015
- [14] **H. Wang, J. Qin, F. Zhang**. *A New Interaction Method for Augmented Reality Based on ARToolKit*. 8th International Congress on Image and Signal Processing. pp.578-583, 2015
- [15] *Google Cardboard*. [Online]. <https://vr.google.com/cardboard/>, (参照 2016-08-21)
- [16] *Google Cardboard*. [Online].
<http://vrsource.com/is-google-cardboard-worth-buying-11/>, (参照 2016-08-21)
- [17] *Kinect*. [Online].
<http://www.xbox.com/ja-JP/xbox-one/accessories/kinect-for-xbox-one>, 2016
- [18] *Kinect*. [Online] .
<http://electronics.howstuffworks.com/microsoft-kinect2.htm>, 2016
- [19] **Kimura et al**: *United States Patent*, No: US 8,113,432 B2, Feb 2012
- [20] *B-Core Inc. Colorbit Reference*, [Online].
http://www.colorbit.jp/en/wpcontent/uploads/2010/05/colorbit_reference_EN2.pdf, (参照 2016-08-21)
- [21] **D. Bradley, B. Atcheson , I. Ihrke , W. Heidrich**. *Synchronization and rolling shutter compensation for consumer video camera arrays*. Computer Vision and Pattern Recognition Workshops. pp.1-8, 2009

- [22] **O. Ait-Aider, N. Andreff, J. Lavest, P. Martinet**, *Simultaneous Object Pose and Velocity Computation Using a Single View from a Rolling Shutter Camera*. ECCV 2006, Part II, LNCS 3952. pp.56–68, 2006
- [23] **C. Liang, L. Chang, H. Chen**. *Analysis and Compensation of Rolling Shutter Effect*. Image processing IEEE transactions. Vol. 17, No. 8, pp.1323-1330, 2008
- [24] *Pokémon GO*. [Online]. <http://www.pokemongo.jp>, 2016
- [25] 植松裕子. 展望2: 位置合わせ技術, 情報処理 Vol.51 No.4, pp373-378, 2010
- [26] **H. Tamura**. *Steady steps and giant leap toward practical mixed reality systems and applications*. In VAR'02: Proc. Int'l Status Conf. on Virtual and Augmented Reality, Leipzig, Germany, 2002.
- [27] **H. Tamura**. *Overview and Final Results of the MR Project*, Proc. Int'l Symp. Mixed Reality (ISMR 2001), Virtual Reality Soc. Japan, Tokyo, pp.97-104, 2001
- [28] **R. Mysore, G. Porter, A. Vahdat**. *FasTrak: enabling express lanes in multi-tenant data centers*. Proceeding. CoNEXT '13 Proceedings of the ninth ACM conference on Emerging networking experiments and technologies. pp.139-150, 2013
- [29] **RG. Parent, S. House, J. Guise, N. Hagemeister**. *A simple and rapid method for electromagnetic field distortion correction when using two Fastrak sensors for biomechanical studies*. Journal of Biomechanics. Vol. 41, Issue 8, pp.1813-1817, 2008
- [30] **J. Rekimoto**. *Matrix: A Realtime Object Identification and Registration Method for Augmented Reality*, Proc. of Asia Pacific Computer Human Interaction APCHI, 1998
- [31] **M. Fiola**. *ARTag, An Improved AR Marker System Based on ARToolkit*. National Research Council Canada, pp.1-36, 2004
- [32] **M. Fiola**. *ARTag, a fiducial marker system using digital techniques*. Computer Vision and Pattern Recognition, IEEE Computer Society Conference vol. 2, pp.590- 596, 2005
- [33] *NyARToolkit*. [Online]. <http://nyatla.jp/nyartoolkit/wp/>, (参照 2016-08-21)
- [34] *NyARToolkit*. [Online]. <http://nyartoolkit-and.osdn.jp/>, (参照 2016-08-21)
- [35] **P. Medicherl, G. Chang, P. Morreale**. *Visualization for increased understanding and learning using augmented reality*. MIR '10 Proceedings of the international conference on Multimedia information retrieval . pp.441-444, 2010
- [36] **X. Zhang, Y. Yan**. *Research and analysis of the Virtual Reality with FLARToolkit*. Mechatronic Science, Electric Engineering and Computer (MEC), 2011 International Conference. pp.1614 – 1617, 2011
- [37] *QR code*. 特許出願公開番号: 特開平 7-25407 二次元コード
- [38] *QR コードドットコム*. [Online]. <http://www.qrcode.com/>, 2016
- [39] 河本悠, 日浦慎作, 浅田尚紀. 符号化開口を用いたバーコード画像のぼけ除去. 研究報告 コンピュータビジョンとイメージメディア(CVIM), Vol. 2011-CVIM-177, No. 14, pp.1-8, 2011
- [40] 加藤祐二, 高橋友和, 出口大輔, 井手一郎, 村瀬洋. 低解像度 QR コード認識のための2値グリッド拘束付き2段階超解像. 電子情報通信学会論文誌, J96-D, No.2, pp.328-337, 2013

- [41] **B. D. Lucas and T. Kanade.** *An iterative image registration technique with an application to stereo vision.* International Joint Conference on Artificial Intelligence, 1981.
- [42] **C. Tomasi, T. Kanade.** *Detection and Tracking of Point Features.* Carnegie Mellon University Technical Report CMU-CS-91-132, 1991
- [43] **D. Lowe.** *Distinctive Image Features from Scale-invariant Keypoints.* Journal of Computer Vision. Vol.60, No.2, pp.91-110, 2004
- [44] **D. Lowe.** *Object recognition from local scale-invariant features.* Proceedings of the International Conference on Computer Vision ICCV Corfu, pp.1150–1157, 1999
- [45] **G. Klein, D. Murray.** *Parallel Tracking and Mapping for Small AR Workspaces.* Proc. 6th IEEE and ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality. Nara Japan, 2007
- [46] **H. Bay, T. Tuytelaars, L. Gool.** *SURF: Speeded Up Robust Features.* Computer Vision – ECCV. pp.404-417, 2006
- [47] **H. Bay, A. Ess, T. Tuytelaars, L. Gool.** *Speeded-Up Robust Features (SURF).* International Journal of Computer Vision and Image Understanding (CVIU). Vol. 110, No. 3, pp.346-359, 2008.
- [48] **H. Bay, T. Tuytelaars, L. Gool.** *SURF: Speeded Up Robust Features.* European Conference on Computer Vision, ECCV, 2006
- [49] **G. Klein, D. Murray.** *Parallel Tracking and Mapping for Small AR Workspaces.* Proc IEEE/ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality, 2007
- [50] **J. Sheng, S. Tano, S. Jia.** *Mobile robot localization and map building based on laser ranging and PTAM.* 2011 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation. pp.1015 – 1020, 2011
- [51] **T. Verbelen, P. Simoens, F. Turck, B. Dhoedt.** *A component-based approach towards mobile distributed and collaborative PTAM Mixed and Augmented Reality .* 2012 IEEE International Symposium. pp.329-330, 2012
- [52] **F. Zhang, J. Guo, B. Wang, J. Jiang.** *The design and implementation of interactive game based on PTAM.* 2015 8th International Congress on Image and Signal Processing. pp.47-51, 2015
- [53] **G. Klein, D. Murray.** *Parallel Tracking and Mapping for Small AR Workspaces.* Mixed and Augmented Reality, 2007. 6th IEEE and ACM International Symposium, pp.225-234, 2007
- [54] **E. Rosten, T. Drummond.** *Machine learning for high-speed corner detection .* 9th European conference on Computer Vision. pp.430-443, 2006
- [55] **T. Lee, T Hollerer.** *Handy ar: Markerless inspection of augmented reality objects using fingertip tracking.* 11th IEEE International Symposium on Wearable Computers. pp.83-90, 2007
- [56] **T. Lee, T Hollerer.** *Hybrid feature tracking and user interaction for markerless augmented reality.* IEEE Virtual Reality Conference. pp.145-152, 2008
- [57] カメレオンコード. [Online]. <http://www.shift-2005.co.jp/>, (参照 2016-08-21)
- [58] 遠藤 広行. 論題: カメレオンコード 特集 新しいコードの活用例. 自動認識 / 月刊自動認識編集委員会 日本工業出版, 20(11) (通号 265). pp.6-11, 2007

- [59] 小堀 訓成, 出口 大輔, 高橋 友和, 井手 一郎, 村瀬 洋.
検出しやすくボケにロバストな符号化マーカの提案. 電子情報通信学会技術研究報告. IE, 画像工学 114(350), pp.19-24, 2014
- [60] バーコード. [Online].
<http://www.keyence.co.jp/barcode/special/codereader/lecture/>, (参照 2016-08-21)
- [61] バーコード. [Online].
http://www.sato.co.jp/products/automatic_recognition/bar-code.html, (参照 2016-08-21)
- [62] 廣瀬通孝. 五感工学の基礎. 映像情報メディア学会誌. Vol.61, No.10, pp.1405-1411, 2007
- [63] 岩田洋夫. ハプティックインタフェース 計測と制御 .Vol. 38 , No.6 ,pp.391-396, 1999
- [64] **Y. Ikei, M. Shiratori.** *Texture Explorer: A tactile and force display for virtual textures.* Proceedings of the 10th Symp. On Haptic Interfaces for Virtual Envir. & Teleoperator Sys. pp.327-334
- [65] **A. Kirkpatrick, S. Douglas.** *Application-based evaluation of haptic interfaces.* Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems, 2002. HAPTICS 2002. Proceedings. 10th Symposium, pp.32-39, 2002
- [66] **D.W.F. van Krevelen and R. Poelman.** *A Survey of Augmented Reality Technologies,* The International Journal of Virtual Reality Applications and Limitations, 9(2). pp.1-20, 2010
- [67] *Haptic Master.* [Online].
http://intron.kz.tsukuba.ac.jp/hapticmaster/hapticmaster_e.html, (参照 2016-08-21)
- [68] **R. Linde, P. Lammertse, E. Frederiksen, B Ruiter.** *The HapticMaster, a new high-performance haptic interface.* FCS Control Systems, The Netherlands. pp.1-5.
- [69] 青木 孝文, 三武 裕玄, 長谷川 晶一, 佐藤 誠. ワイヤによる皮膚感覚刺激を用いた指先装着型接触感提示デバイス. 日本バーチャルリアリティ学会論文誌. Vol.14, No.3, 2009
- [70] 佐藤 誠, 平田幸広. 仮想作業空間のためのインタフェース・デバイス -SPIDAR-. 信学技報. pp.89-88, 1989
- [71] 佐藤 誠, 平田幸広, 河原田弘. 空間インタフェース装置 SPIDAR の提案. 電子情報通信学会論文誌. J74-D, No.7, pp.887-894, 1991
- [72] 田島 寛之, 赤羽 克仁, 季 雨農, 佐藤 誠. 6 自由度力覚提示装置 SPIDAR-I の提示力等方性について. 情報処理学会 インタラクション. pp.676-681, 2014
- [73] 中井章人, 國井康晴, 橋本秀紀. 7 自由度人間装着型 Haptic Interface の開発. 日本ロボット学会誌. Vol.17 No.8, pp.1126-1133, 1999
- [74] 岩田洋夫, 市ヶ谷敦郎. *Haptic Screen.* 日本バーチャルリアリティ学会大会論文集. Vol. 1, pp.7-10, 1996
- [75] 古川剛, 井上健司, 前 泰志, 田窪 朋仁, 新井 健生. 柔軟シートを用いた遭遇型の視覚触覚ディスプレイに関する研究. 日本機械学会. 日本機械学会コンファレンス, Proceeding. No. 8-4, pp.1-4, 2008
- [76] **D. Hoiem.** *Projective Geometry and Camera Models.* Computer Vision CS 543 / ECE 549 University of Illinois. pp.1-57, 2011

- [77] *The OpenCV Reference Manual Release 2.3*. [Online]. www.opencv.org, 2011
- [78] **R. Brannon**. *A review of useful theorems involving proper orthogonal matrices reference to three-dimensional physical space*. pp.1-167, 2002
- [79] **Z. Zhang**. *A Flexible New Technique for Camera Calibration*. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. Vol. 22, No. 11, pp.1330-1334, 2000.
- [80] **C. Lai, C. Wang**. *Mobile Edutainment with Interactive Augmented Reality using Adaptive Marker Tracking*. IEEE 18th International Conference on Parallel and Distributed Systems. pp.124-138, 2012
- [81] **C. Liang, L. Chang, H. Chen**. *Analysis and Compensation of Rolling Shutter Effect*. Image processing IEEE transactions. Vol. 17, No. 8, pp.1323-1330, 2008
- [82] **C. Geyer, M.Meingast, S. Sastry**. *Geometric models of rolling shutter cameras*. Proc. Omnidirectional Vision Camera Networks and Non-classical Cameras. pp.12-19, 2005
- [83] **O. Ait-Aider, N. Andreff, J. M. Lavest, P. Martinet**, *Exploiting rolling shutter distortions for simultaneous object pose and velocity computation using a single view*. Proc. 4th IEEE Int. Conf. Computer Vision Systems. pp.35-41, 2006
- [84] **O. Ait-Aider, A. Bartoli**. *Kinematics from lines in a single rolling shutter image*, *Computer Vision and Pattern Recognition*. 2007. CVPR '07. IEEE Conference. pp.1-6, 2007
- [85] **M. Wäny, G. Israel**. *CMOS Image Sensor With NMOS-Only Global Shutter and Enhanced Responsivity*. IEEE Transactions on Electron Devices, Vol. 50, No. 1, pp.57-62, 2003
- [86] *OpenGL*. [Online]. <http://www.opengl.org/>, (参照 2016-08-21)
- [87] **M. Segal, K. Akeley**. *The Design of the OpenGL Graphics Interface*. Silicon Graphics, Inc. pp.1-10, 1994
- [88] *Oculus Rift*. [Online]. <https://www3.oculus.com/en-us/rift/>, (参照 2016-08-21)
- [89] *PlayStation 4*. [Online]. (参照 2016-08-21)
- [90] *PlayStation VR*. [Online]. <http://www.jp.playstation.com/psvr/>. (参照 2016-08-21)
- [91] *LeapMotion*. [Online]. <https://www.leapmotion.com/?lang=jp/>. (参照 2016-08-21)
- [92] **G. Marin, F. Dominio, P. Zanuttigh**. *Hand gesture recognition with leap motion and kinect devices*. Image Processing (ICIP), IEEE International Conference. pp.1565-1569, 2014
- [93] *XBOX*. [Online]. <http://www.xbox.com/ja-JP/>. (参照 2016-08-21)
- [94] *Nintendo Wii*. [Online]. <https://www.nintendo.co.jp/wii/>. (参照 2016-08-21)
- [95] *HTC VIVE*, [Online]. <https://www.vive.com/jp/>, 2016. (参照 2016-08-21).
- [96] **M. Stengel, S. Grogorick, M. Eisemann, E. Eisemann, M. Magnor**. *An Affordable Solution for Binocular Eye Tracking and Calibration in Head-mounted Displays*. Proceedings of the 23rd ACM international conference on Multimedia. pp.15-24, 2015
- [97] *BowtsNew VR*. [Online]. <http://botsnew.com/>, (参照 2016-08-21)
- [98] *Daydream*. [Online]. <https://vr.google.com/daydream/>, (参照 2016-08-21)
- [99] *Daydream*. [Online].

<http://www.pocket-lint.com/news/136542-what-is-google-daydream-and-what-devices-support-it-google-s-android-vr-platform-explained>, (参照 2017-01-11).

- [100] 飯田一郎, 野呂影勇. *肌評価技術のモデル化に関する研究*. 人間工学. Vol.33, No.3, pp.141-149, 1997.
- [101] 奈迫光男. *衝撃吸収材*. 日本義肢装具学会. Vol., 4, No.2. pp.123-126, 1988

図表目次

目次

図 1.1-1	AR/VR 市場成長の予測 (Digi-Capital 社 2016)	2
図 1.1-2	バーチャル世界に感触がないときの違和感	3
図 1.1-3	コンピュータビジョン(CV) [3]	4
図 1.1-4	VOIT の概要	7
図 1.1-5	MR, AR, VR の関係	8
図 1.2-1	研究の全体構成を示す技術要件マトリクスチャート	11
図 1.3-1	VOIT の実世界とバーチャル世界における構成	14
図 1.4-1	章立てと研究成果の俯瞰図	17
図 1.4-2	ローリングシャッタ歪み	19
図 2.1-1	物体認識技術の進歩	22
図 2.1-2	ARToolKit	24
図 2.1-3	KLT Tracker のよる特徴点抽出	25
図 2.1-4	PTAM による点群抽出	26
図 2.1-5	Handy AR	27
図 2.1-6	カメレオンコード	28
図 2.1-7	1次元バーコード	29
図 2.1-8	1次元データタグ カラービット	29
図 2.1-9	カラービットのデザイン自由度	30
図 2.1-10	カラービットを使用した, ファイル検索システム	30
表 2.1-1	視覚認識方式と要件	31

図 2.1-11	物体とコンピュータのインタラクション技術.....	34
図 2.1-12	PHANToM [66]	35
図 2.1-13	Haptic Master [67]	36
図 2.1-14	接地型と非接地型の力覚提示 [67]	37
図 2.1-15	SPIDAR-G [72]	37
図 2.1-16	Sensor Glove II [73]	38
図 2.1-17	Haptic Screen [74]	39
図 3.1-1	3章における技術要件マトリクスチャート	41
図 3.1-2	カラービットの仕組み	42
図 3.1-3	色遷移の法則	42
図 3-2-4	色彩の調整	44
図 3.2-1	L字型に変形 (2次元化)	45
図 3.2-2	世界座標系におけるL字マーカとイメージセンサ面の関連	45
図 3.2-3	L字マーカの設計	46
図 3.3-1	3次元姿勢推定のフローチャート	47
図 3.3-2	ピンホールカメラモデル	48
図 3.4-1	測定系	50
表 3.4-1	実験環境の仕様	51
図 3.4-2	測定画面のスクリーンショット	51
図 3.4-3	X軸回転の誤差	52
図 3.4-4	Y軸回転の誤差	53
図 3.4-5	Z軸回転方向の誤差.....	54

図 3.4-6	Z 軸回転にともなう X 軸の限界回転角度	55
図 3.4-7	X 軸回転にともなう Z 軸方向の並進誤差	55
図 3.5-1	風船に装着した従来型 AR マーカ	57
図 3.5-2	NyARToolkit での歪曲評価	58
図 3.5-3	L 字マーカの歪曲評価	59
表 3.6-1	L 字型 2 次元マーカによる 3 次元姿勢推定の実現	60
図 4.1-1	4 章における技術要件マトリクスチャート	61
図 4.1-2	高速ハンドル操作をともなうポータブルゲーム	63
図 4.2-1	ローリングシャッタ歪み現象	65
図 4.3-1	3 次元 AR マーカ	67
図 4.3-2	3 次元 AR マーカの回転	68
図 4.3-3	3 次元 AR マーカ認識のシステムフロー	69
図 4.4-1	測定装置	71
図 4.4-2	認識された 3 次元 AR マーカ	72
図 4.4-3	3 次元 AR マーカの高速回転と RS 歪み	73
図 4.4-4	著しい RS 歪み時におけるマーカのトラッキング確認	73
図 4.4-5	回転角度と 3 次元 AR マーカの位置関係	74
図 4.4-6	時間経過に対する物理回転と 3 次元姿勢推定値	75
図 4.4-7	マーカの 360 度回転と CG オブジェクトの描画	76
図 4.4-8	視認方向におけるオクルージョン	76
図 4.5-1	3 次元 AR マーカにおける曲がり部分の現実ラウンド形状と理想ライン	78

図 5.1.1	5章における技術要件マトリクスチャート	79
図 5.1-1	4章で開発した3次元ARマーカ	81
図 5.3-1	VRシステム	82
図 5.3-2	仮想引力を有する1本橋	83
図 5.3-3	3次元ARマーカ+	84
図 5.3-4	マーカ視覚認識の方向性	85
図 5.3-5	全方位マーカの例	85
図 5.3-6	システム動作フロー	86
図 5.4-1	実験システム	87
図 5.4-2	無彩色背景での3次元ARマーカの認識	88
図 5.4-3	無彩色背景における認識の比較実験	88
図 5.4-4	有彩色背景における認識の比較実験	89
図 5.4-5	Y軸回転方向の視覚認識の誤差	90
表 5.5-1	Y軸回転方向の視覚認識の誤差	91
図 6.1-1	6章における技術要件マトリクスチャート	92
図 6.2-1	Google Daydream	96
図 6.3-1	スポンジによる力覚センシング	98
図 6.3-2	L字マーカ的设计	100
図 6.3-3	適用例	102
図 6.3-4	システム構成	102
図 6.3-5	システムフロー	103
図 6.4-1	ポリウレタンとポリエチレンの比較	105

図 6.4-2	スポンジ柔軟度の測定系	106
図 6.4-3	押す力とスポンジ変位置の関係	106
図 6.4-4	セル位置変位の測定装置	107
図 6.4-5	変位置 0mm のとき (歪曲無し)	108
図 6.4-6	変位置 35mm のとき (歪曲有り)	108
図 6.4-7	X 軸方向のセル位置変位置	110
図 6.4-8	Y 軸方向のセル位置変位置	111
図 6.4-9	ユークリッド距離による評価	112
図 6.5-1	無限平面に相当するスポンジ	115
図 6.5-2	スポンジサイズと変位置	115

論文目録

1. 査読付き論文

- (1) 宇佐美真, 杉村博, 一色正男
 “人が柔軟性を有する実体物とのインタフェースを行うためのマーカ視覚認識のみによる力覚フィードバック方式の検討”, 情報処理学会論文誌 コンシューマ・デバイス&システム, Vol.7, No.2, pp.64-75, 2017
 (採録決定済み 2017年2月21日)
- (2) 宇佐美真, 杉村博, 三浦喬平, 一色正男
 “人の動作に対してグラフィクスを高速かつシームレスに追従させる 3次元 AR マーカの開発”, 情報処理学会論文誌 コンシューマ・デバイス&システム, Vol.5, No.4, pp.1-9, 2015

2. 国際会議論文 (査読付き)

- (1) Makoto Usami, Kyohei Miura, Hiroshi Sugimura and Masao Isshiki, “3D Augmented Reality Marker Expands Workable Fields of Virtual Reality Action Games”, 4th IEEE Global Conference on Consumer Electronics, Osaka, Japan, pp.306-310, 2015

他 1 件

3. 学会発表

- (1) 宇佐美真, 杉村博, 一色正男, ” 人が柔軟性を有する実体物とのインタフェースを行うためのマーカ視覚認識のみによる力覚フィードバック方式の検討”, 2016-CDS-17, 2016-08-17, No.11, pp.1-8, 2016
- (2) 江夏吉彦, 貝瀬峻, 横須賀京介, 宇佐美真, 関家一雄, 一色正男, ” カラービットを AR マーカーとした「スマートフォンを HMD に利用した機器情報リアルタイム提示基盤」の研究”, 2016-CDS-16, 2016-05-26, No.15, pp.1-5, 2016

- (3) 宇佐美真, 杉村博, 三浦喬平, 一色正男, ” 新 3 次元マーカの活用により動作環境範囲を拡大させたバーチャルリアリティアクションゲーム方式の提案” , 2015-CDS-14, 2015-09-24, No.4, 2015
- (4) Masayuki Kaneko, Kazuki Arima, Makoto Usami, Hiroshi Sugimura, Masao Isshiki and Keishin Koh” Development of Information Living Integrated by Home Appliances and Web Services” , 2015 IEEE 4th Global Conference on Consumer Electronics 2015-07-07, Osaka, Japan, pp.311-312, 2015
- (5) 内海和貴, 岡本健司, 村上隆史, 宇佐美真, 杉村博, 一色正男, ” クラウド型 HEMS サービス基盤の研究” , 2015-CDS-13, 2015-05-14, No.1, pp.1-4, 2015
- (6) 手平祐希, 有馬一貴, 宇佐美真, 杉村博, 一色正男, ” 聴覚障がい者のための音声認識システムの音声ピッチ調整方法” , 第 77 回情報処理学会全国大会 5V-02, 2015, 学生奨励賞
- (7) 波多野匠, 手平祐希, 宇佐美真, 杉村博, 一色正男, ” パッシブを利用した自然光制御装置の開発” , 第 77 回情報処理学会全国大会, 3V-08,p2, 2015
- (8) 有馬一貴, 金子将之, 宇佐美真, 杉村博, 一色正男, ” CONCON:節電を継続するための HEMS 支援ツール” , FIT2015 情報科学技術フォーラム, O-015, pp. 453-454, 2015, 学生奨励賞
- (9) 坂本優大, 安藤夏生, 岡本健司, 宇佐美真, 三栖貴行, 一色正男, ” デジタルカメラ画像を用いた照度測定の検討” , FIT2015 情報科学技術フォーラム, I-012, p4, 2015
- (10) 杉村博, 宇佐美真, 村上隆史, 大和田茂, 渡部智樹, 一色正男, ” ビデオアノテーションを利用したサラウンド照明システムの開発” , 電気学会論文誌 C (電子・情報・システム部門誌) , Vol.135, No.8, pp.1034-1035, 2015
- (11) 宇佐美真, 三浦喬平, 杉村博, 一色正男, ” 人の動作に対してグラフィクスを高速かつシームレスに追従させる 3 次元 AR マーカの開発”, 2014-CDS-12, 2014-12-24, Nov.3, pp.1-8, 2014

(12) Makoto Usami, Kyohei Miura, Masao Isshiki ” Augmented Reality System to use 3-dimensional Marker for 360-degrees Graphic Rotations Seamlessly in Hand-Motions” , 2014-CDS-11, 2014-08-20, No.9, pp.1-8, 2014

4. 特許出願

(1) 出願 2008 年, 成立 2013 年, 菅原充, 宇佐美真, 秋山知之

“レーザシステム” (登録 5362301 号)

(2) 出願 2006 年, 成立 2009 年, 今野上知郎, 宇佐美真

“撮像装置及び撮像方法” (登録 4293236 号)

(3) 出願 1997 年, 成立 2002 年, 宇佐美真, 中島孝嗣

“ホワイトバランス調整回路及び撮像装置” (登録 3890683 号)

(4) 出願 1994 年, 成立 2013 年, 宇佐美真

“撮像装置” (登録 3467845 号)

(5) 出願 1991 年, 成立 2002 年, 宇佐美真

“可変利得制御回路とビデオカメラ” (登録 3286989 号)

(6) 出願 1991 年, 成立 2001 年, 宇佐美真

“ビデオカメラの調整方法” (登録 3218643 号)

(7) 出願 1991 年, 成立 2001 年 宇佐美真

“固体撮像装置および遮光検出装置” (登録 3153918 号)

ほか 25 件, 登録 2 件

5. 紀要

宇佐美真, “バーチャルリアリティゲーム用途を想定し, 操作物形状に最適化できる形状自由度特性を有したマーカ技術の有効性検討”, 紀要, 神奈川工科大学研究報告.B, 理工学編, B (40), pp.11-17, 2016

6. 記事掲載

(1) M.Sugawara, M.Usami, ” Quantum Dot Devices : Handling the Heat” , Nature Photonics, Vol.3, pp.30-31, 2009