

ARToolKit と力覚提示装置を用いた力触覚提示の検討

A Study of Haptic Environment using both Force Display and ARToolKit

橋本 渉, 山本 達也

Wataru HASHIMOTO and Tatsuya YAMAMOTO

大阪工業大学 情報科学部

(〒573-0196 大阪府枚方市北山 1-79-1, whashimo@is.oit.ac.jp)

Abstract: This study discusses about the potential of ARToolKit that is applied to the haptic environment. The position and orientation of the physical marker is easily detected by video tracking capabilities of ARToolKit. The detected information of the marker is also utilized for providing the sense of touch the virtual object associated to the marker. Some visual/haptic combination problems, caused by the difference of each servo-rate and accuracy, are examined through this environment.

Key Words: ARToolKit, Augmented haptics, Registration

1. 研究の背景

ARToolKit と呼ばれるソフトウェアライブラリにより, A R (Augmented Reality) 環境が簡単に利用できるようになっている. 市販されているカメラとコンピュータがありさえすれば, カメラ視野内のマーカ上にバーチャル物体を表示することができる. 画像認識や位置合わせなど, 高度な技術や知識が少なくても簡単に実現できるため, さまざまな分野に普及し, 応用が期待されている.

一方, 力覚提示を実現する装置についても, 研究用の装置のみならず, 一般向けの装置が市販されるようになってきた. これらの装置はコンピュータゲームのジョイスティックやコントローラとして商品となっているが, 最近ではアームの自由度が豊富になってきており, プリミティブな3次元形状の力覚提示ができるようになってきている. OpenHaptics などのライブラリなどを活用することにより, さらに高度な力覚表現が可能となっている. しかしながら, プログラミングなどの情報技術と, 力覚提示に関する基本的な方法論の理解が必要であり, 依然として敷居が高いものとなっている.

本研究では, 市販されている装置と, 普遍的に入手可能なソフトウェアにより, 一般の人でも手軽に力覚提示環境を構築することができることを目指す. 力覚提示における課題の一つは, 視覚との融合である. 力覚提示において, 視覚提示を伴わないアプリケーションはまれである. 視覚との融合の際, 装置の操作空間と映像の表示位置が一致しなければ, 直感性を失い, 著しく操作性が悪化する. ここでは, ARToolKit の持つマーカの位置合わせと重畳表示の技法を応用する. 本報告では, ARToolKit を力覚提示に適用する場合の問題点や応用例などを整理する.

2. 基本構成

2.1 システム概要と使用器具

ARToolKit と力覚提示装置をどのように用いるかを図1で説明する. ARToolKit のマーカは力覚提示装置とオブジェクト用に2つ用意する. カメラで力覚提示装置のマーカを観察することにより, 装置の位置を把握することができる. さらに, 力覚提示装置の内界センサによりエンドエフェクタの位置を取得し, モニタ上にカーソルを表示することができる. 一方, カメラでオブジェクトのマーカを観察することにより, マーカに関連付けられたバーチャル物体をモニタ上に表示させる. このとき, 力覚提示装置から, バーチャル物体に対して作用できるようにする.

ここでは, 操作空間と表示空間を完全に一致させているわけではないが, 最終的にはビデオシースルー式HMD等を用いて, 操作空間と表示空間の完全一致を目指す.

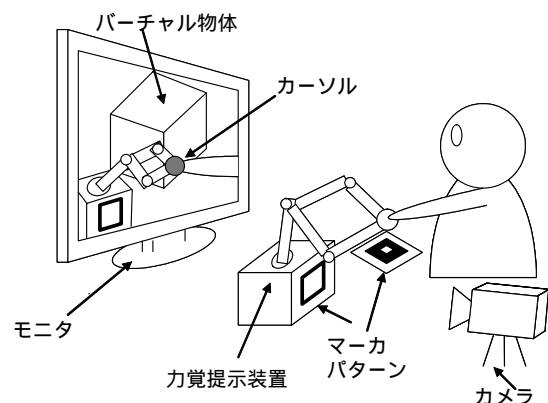


図2 システム概要図

2.2 処理の流れ

ARtoolkit によると、マーカの位置姿勢は同次変換行列で取得することができる。したがって、適切な座標変換を施すことにより、力覚提示装置と表示オブジェクトとの位置関係を求めることができる。装置の位置関係と座標変換に関する情報を図 2 に示す。

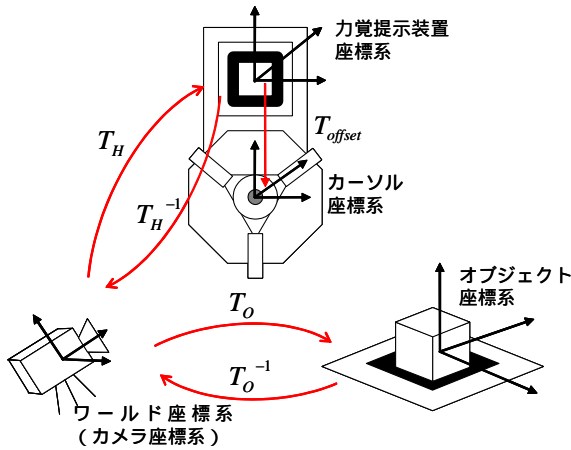


図 2 処理の流れ

ワールド座標系としてカメラ座標系を定義すると、その座標系を基準に力覚提示装置のマーカへの同次変換行列 T_H とオブジェクトのマーカへの同次変換行列 T_o が得られる。カメラ画像にオブジェクト映像を重畳表示させる場合は、変換行列 T_o を用いることになる。また、カメラ画像に力覚提示装置のカーソルを表示する場合は、力覚提示装置のマーカからカーソルの位置への変換行列を T_{offset} とすると、 T_H と T_{offset} の積で表すことができる。

力覚提示においても、この同次変換行列を用いる必要がある。例えば、力覚提示装置の座標系を基準として、オブジェクトの位置を求めたい場合は、

$$T = T_{offset} \cdot T_H \cdot T_o^{-1} \quad (1)$$

であらわされる同次変換行列 T が必要であることがわかる。ここでの T_o^{-1} は、 T_o の逆行列を意味している。

オブジェクト座標系を基準としてカーソルの位置を求めたい場合は、 T^{-1} が必要となる。ただし、オブジェクト座標系を基準として力覚を算出した場合、力覚提示装置の座標系に変換する必要があるため、力ベクトルに T を積算することになる。

2.3 実装

マーカ観察用のカメラとして、Logicool Qcam Orbit AF、力覚提示装置として Novint Falcon を使用した。これらは市販されている商品であり、特殊な動作環境を必要としないのが特徴である。

Qcam Orbit AF は 200 万画素の USB カメラで、画角が対角で 75 度、フレームレートが 30fps となっている。カメラは首振り機能を持っており、パンチルト方向にそれぞれ

± 95 度、 ± 51 度回転できるようになっている。回転の分解能は回転範囲に対して 200 ステップである。首振りには PC から制御することが可能であるため、広い範囲からマーカを探すのに適している。

Novint FALCON は 3 自由度の接地型力覚提示装置で、ゲームのコントローラとして市販されている。筐体から 3 本のアームが出ており、アーム先端に三角形トッププレートと丸いグリップが取り付けられている。グリップの稼働範囲は最大で $10\text{cm} \times 10\text{cm} \times 10\text{cm}$ 、700gF 以上、精度は 0.06mm となっている。装置は USB によって接続され、HDAL と呼ばれるドライバを介して制御できる。

マーカ観察用のカメラと力覚提示装置は、同一の PC で制御をおこなう。ARToolKit と HDAL 関連のプログラム開発においては、WindowsXP+VisualStudio2005 を用いた。図 3 は、観察用カメラから力覚提示装置のマーカとオブジェクトのマーカを見ている様子である。力覚提示装置のグリップ部には、操作点を示すカーソル、オブジェクトのマーカ上には立方体を重畳表示している。写真でもわかるとおり、カーソルはグリップの中心には一致していない。この精度の問題については後述する。



図 3 観察用カメラからの動作の様子

3. ARToolkit と力覚の融合における問題点

力覚と視覚を同時に表示するとき生じる問題としては、映像と反力生成における更新速度の違いというような時間的なずれ問題がある。また、ARToolKit においては、マーカの読み取り精度による、空間的なずれの問題があり、いずれも力覚提示における悩ましい影響を与える。さらに本研究の場合、マーカがグリップと隣接するため、オクルージョンの問題もある。それぞれの問題点について考察し、検討をおこなう。

3.1 更新速度の違いによる問題

力覚提示においてよく知られる問題の一つは、視覚生成と力覚生成において、必要とされる更新速度が異なる点である。視覚に比べ力覚は繊細であり、違和感を与えないようにするには、1kHz 以上の早い更新速度が必要である。それに対して視覚の場合は、秒間 10 フレーム程度でも動画として認識することができる。この問題に対してよく用い

られる解決策は、視覚と力覚の処理ループを分けるという手法である。

しかし本研究の場合、オブジェクトや力覚提示装置の挙動をマーカから取得しているため、カメラのフレームレートに依存することになる。力覚提示装置が接地型の場合は、頻りに動かさないため大きな問題にならないが、オブジェクトの移動に関しては、コマ送りのような力覚提示になってしまう。マーカの位置姿勢をハイスピードカメラ等で取得すればよいが、力覚に対抗できるようなカメラの利用は本研究の主旨から外れる。また高速に撮影する映像は、解像度を犠牲にするため、次に述べる位置あわせの精度が低下する恐れもある。

この問題については、カメラの数を増やし、複数カメラによって得られたマーカ情報を用いることで、見かけ上の更新速度を上げることにしているが、本質的な解決とはいえない。

3.2 位置あわせにおける問題

ARToolKit では、マーカをカメラで読み取り、画像処理によって位置姿勢を検出するという性質上、誤差は免れない。誤差の大きさは、カメラの解像度や画面上に表示されるマーカの大きさ、向きに依存するため、マーカが遠ざかったり、斜めになったりすると位置姿勢の誤差が大きくなる。最大の問題は、カメラ光軸上（Z 軸）における精度が悪いという点である（図 4）。カメラからマーカへの距離を、マーカの大きさによって検出しているため、避けられない問題となっている。実際にカメラの正面にマーカを配置してみたところ、X 軸や Y 軸に対して Z 軸の誤差が 3 ~ 5 倍以上大きくなることがわかった。

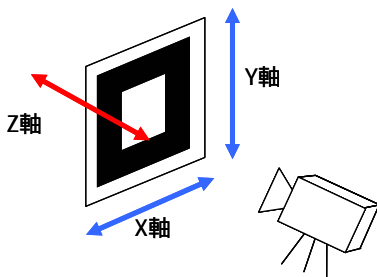


図 4 カメラ光軸（Z 軸）の距離精度

この問題を安直に解決する方法として、マーカを物理的に大きくしたり、カメラの解像度を上げて精度を向上させたりする方法がある。ただ、マーカを大きくすると、後述のオクルージョン問題が生じる。またカメラ解像度を上げるとフレームレートが低下し、更新速度の差が大きくなる。

2章の基本構成において、マーカ上に立方体を力覚表現してみたところ、カーソルとオブジェクトの位置が不安定で、振動が大きすぎてマーカ上のオブジェクトを触れないほどであった。これは、力覚提示装置のマーカの誤差と、オブジェクトのマーカの誤差が(1)式により積算されてしまったためだと考えられる。力覚提示装置が接地型で、頻

りに動かすものではないため、今回は力覚提示装置用のマーカを起動時に一度だけ読み込み、マーカはそれ以降動かさないものとして扱うことにした。

力覚提示装置用のマーカを起動時に一度だけ参照する条件において、実際に物体を力覚提示してみた。1辺 40[mm]の立方体をオブジェクト用のマーカに対応付け、力覚提示装置の手前に配置し、提示された立方体を反時計回りになぞったときの軌跡を図 5 に示す。この図は立方体を俯瞰した状態で、カメラは Z 軸負の方向に位置する。向かって手前の面 (Z=-20) と奥の面 (Z=20) をなぞっているときに、面の法線方向に数 mm 程度の振動を生じていることがわかる。これは、カメラの Z 軸上における誤差に起因している。なめらかな表面であるにもかかわらず、振動してしまうことが確認できる。これ以上の精度向上は見込めないため、後述のように複数台カメラを導入することにした。

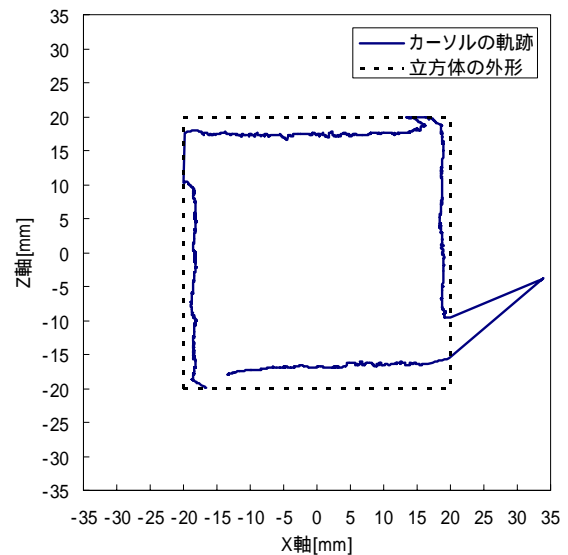


図 5 立方体提示時のなぞり軌跡（カメラ単体）

3.3 オクルージョンの問題

マーカ上にバーチャル物体を表示し、その物体に対して操作を加える場合、マーカに力覚提示装置や人間の手が近づく機会が多くなる。マーカの一部がカメラの視野から欠けると、マーカの位置情報が喪失するため、バーチャル物体の操作が中断されてしまう。マーカとオブジェクトにオフセットを入れることもできるが、マーカとオブジェクトの位置関係が直感的でなくなり、操作性が著しく悪くなる。また、マーカの方向誤差がオフセットにより倍加されるため、オブジェクトが不安定になるなど、有効な解決法とはいえない。

オクルージョンをなくすための安易な解決策は、マーカの良く見える位置にカメラを配置することである。カメラを複数台利用できるなら、カメラの相互位置を把握した状態で、マーカを検出できればよい。

4. 複数カメラによる誤差とオクルージョンの軽減
 カメラを複数用いることにより、オクルージョンの軽減と、カメラ光軸方向の誤差を低減させることを試みた。ここでは、観察用のカメラのほかにもう一台カメラを導入し、検証を試みる。

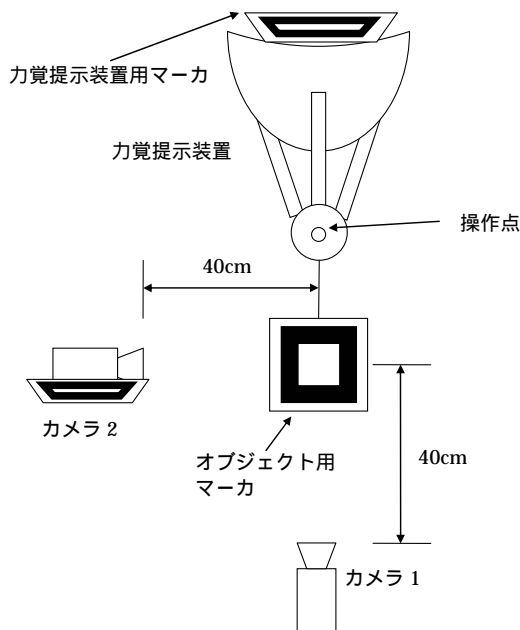


図6 カメラ2台による誤差・オクルージョンの軽減環境

図6はカメラをオブジェクト用マーカの真横においた配置の一例である。これは、3.2で述べたように、カメラ1だけではカメラ光軸(Z軸)方向のマーカ位置検出誤差が大きいため、それを補うための配置である。カメラ2のマーカは、カメラ1によって位置を取得するためのものだが、カメラ1の首振り機能が実現できていないため、現時点では利用されていない。

マーカの位置姿勢は、通常はカメラ1で取得するが、オクルージョンが生じた場合や、揺らぎが大きい軸の値については、カメラ2の値を用いることにした。2台のカメラによる力覚提示の様子を図7に示す。カメラ1でオクルージョンが生じてても、カメラ2による情報に基づいてバーチャル物体を表示できていることがわかる。ただし、カメラ2と配置関係において、微小な誤差を伴うため、カメラが切り替わる瞬間に不自然さが伴う。



図7 カメラ2台によるオクルージョンの回避
 (左:カメラ1でマーカ検出,右:カメラ2でマーカ検出)

本環境において、立方体をなぞったときの軌跡を観察した。提示した立方体など諸条件は2.3と同様である。提示された立方体を反時計回りになぞったときの軌跡を図8に示す。カメラが1台のときに観察されていた数mm程度の微小振動は、本環境においてはほとんど見られなかった。これは、カメラ1において誤差の大きかったZ軸上の値を、カメラ2の値で代用しているからである。

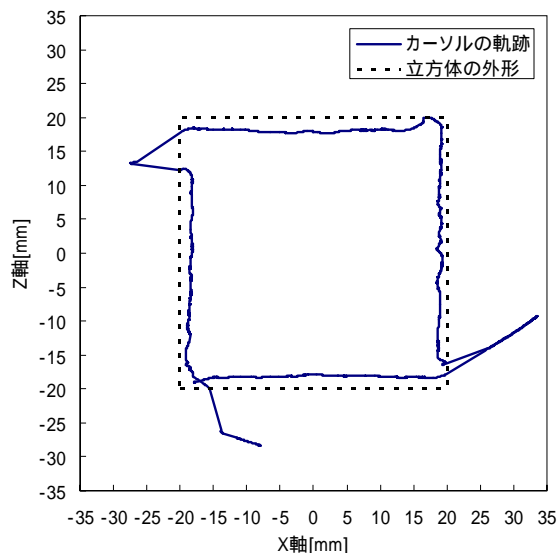


図8 立方体提示時のなぞり軌跡(カメラ2台)

5. まとめと今後の展望

ARToolKit と力覚提示装置を用いた力覚提示の方法について述べ、その実装上の問題点について整理した。特にARToolKitのマーカ読み取りには、カメラの光軸方向において精度が悪くなるという問題があり、力覚提示に導入する場合には留意が必要である。また、マーカのオクルージョンを避けなければならない。適切な位置に複数台のカメラを配置することにより、精度の問題とオクルージョンの問題について解決を図った。

今後はプリミティブだけでなく、空間分解能の高い複雑な形状の提示を試み、空間的な精度について検証してみたい。また、動的に変化する物体を提示し、時間分解能の面からも取り組む。特にカメラのフレームレートと力覚のサーボレートの不整合においては、違和感をどのように緩和するか検討が必要である。

参考文献

[1]http://www.davidcochard.com/projects/CIT/David_Cochard_CIT_report.pdf