



動的プロジェクションマッピングにおける 物体接触時の柔らかさ提示の検討

Consideration of softness presentation during object contact in dynamic projection mapping

山岸祥大, 橋本直己

Shota YAMAGISHI and Naoki HASHIMOTO

電気通信大学 大学院情報理工学研究科 情報学専攻

(〒182-8585 東京都調布市調布ヶ丘 1-5-1, {yamagishi, naoki}@hashimoto.lab.uec.ac.jp)

概要: 手で持って動かす物体に対して投影を行う動的プロジェクションマッピングにおいて, 投影により柔らかさのような質感を視覚的に提示することはできるが, 手で触れるため, 実物体の質感を知覚してしまい, 視覚と触覚の間にギャップが生じてしまう. そこで, 物体に触った際に物体表面が凹む映像を提示することに加え, 触っている指が物体に沈み込むように曲がる動きを知覚させる投影を行うことで, 硬い物体であっても柔らかさを提示する手法を提案する. 本稿ではシステム中の指が曲がる動きを知覚させる部分の実装と効果の検証を行う.

キーワード: 視覚, 動的プロジェクションマッピング, 拡張・複合現実, 柔らかさ知覚, 輝度補正

1. はじめに

近年, プロジェクタを用いて建物の壁等の物体に映像を投影するプロジェクションマッピングが一般にも広く認知されている. これを拡張し, 動く物体に投影を行う動的プロジェクションマッピングも盛んに研究されている. 動的プロジェクションマッピングでは, 投影対象となる物体の追跡手法の他に, 投影によって質感などの物体の見た目を変える研究[1]が行われている.

しかし, 我々が開発している, 手で把持可能な物体に対する動的プロジェクションマッピング[2]では, 硬い対象物体に触ることが前提となるため, 毛並みのような投影をすることで見た目を柔らかく知覚させることはできても, 実際に触れた際には実物体の硬さを知覚してしまう. そのため, 見た目と実物体の硬さのギャップにより, 実物体本来の質感を強く知覚してしまい, 質感や見た目が変化した感覚が薄れてしまうという問題がある. また, 硬い物体を柔らかく知覚させるためには, より強い柔らかさ提示効果が必要となる.

そこで本研究では, 物体に触れた際に, 物体表面が凹んでいるように見せる投影に加えて, 物体に触れている指が物体に沈み込むように曲がる動きを知覚させるための運動情報を含む輝度画像の投影[3]を組み合わせることで, 硬い物体においても柔らかさを知覚させる動的プロジェクションマッピングの実現を目指す. これにより, 剛体への動的プロジェクションマッピングにおける表現に見た目

だけでなく, 触った際の疑似的な質感を与えることができ, 表現の幅を広げると同時にリアリティを向上させることができる. 本稿では, システムの一部実装と実装した機能の効果確認を行う.

2. 関連研究

視覚的な情報により対象物体の柔らかさを操作しようとする研究はいくつか存在する.

Ban ら[4]は, 実物体を親指と人差し指で挟み, 力を加えて物体を押し込めた際に, その物体の変形が実際よりも変化した様子を提示した. その際, 物体を掴んでいる指も見せている物体の変化量に合わせた位置に提示することで, 柔らかさ知覚の操作を行った. しかし, 変化させた物体や指はディスプレイを通して見せており, 我々が対象とする動的プロジェクションマッピングではディスプレイなどを介さずに対象を把持操作するため, 投影により指の位置を変化させることは難しい.

そんな中, Punpongsanon ら[5]は, 投影対象の表面の凹み映像を投影すると同時に, 指に込める力に応じた濃さの赤色投影を行い, 指が物体に加える力を可視化することで物体の柔らかさを操作する手法を提案した. また, 数種類の柔らかい物体を対象として提案手法の効果を示した.

Punpongsanon らは指の位置を動かすということはしなかった一方, Kawabe らが開発した Deformation Lamp[3]は, 運動情報を含む輝度画像を投影することにより, 止まった

対象物体が動いているように見せた。これは、投影面の画像と観察者に見せたい動きの映像（以後、モーション画像）をグレイスケール化して、その差分から作成した輝度画像を投影することで、実際は動いていない投影面に動き情報を付与し、動いているように見せる技術[3]である。動き情報を付与するため、カメラ視点で実際の色を打ち消すような投影を行う技術で実物体のテクスチャを消す必要がない。また、Miyashitaら[6]は Deformation Lamp を動的プロジェクションマッピングに応用して、既知の投影対象物体を動かした際の形状変化を実現した。しかし、これらの研究では見た目の柔らかさを表現していても指で触って柔らかく感じることは検討していない。

3. 提案手法

本研究では、投影対象物体と指が接触した際に、投影対象物体に対して表面が凹む様子を提示し、同時に指に対して運動情報を含む輝度画像を投影して指が物体に沈み込むように曲がる動きを知覚させることで視覚的に柔らかく感じさせる手法を提案する（図1）。本提案手法では強い柔らかさ効果を出すため、2つの表現を組み合わせしており、指への投影では現実の挙動に近い指が物体方向へ曲がる動きを提示する。また、カメラ視点で実物体の色を打ち消す投影では実際の指を消しきれない可能性があることや動的な対象への利用が難しいことから、実際の指を消さずに利用できる運動情報を含む輝度画像投影を利用する。

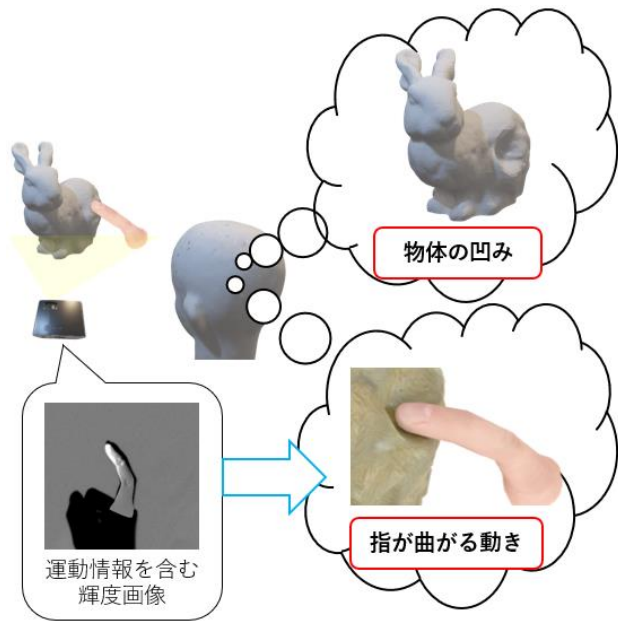


図 1: 提案手法のイメージ

3.1 指が曲がる動きの提示方法

指が沈み込むように曲がる動きを見せるために、実際の指に運動情報を含む輝度画像を投影し、実際の指の曲がり具合よりも曲がった状態を観察させることで沈み込みを実現する。そのための投影画像は、現状の指の状態を映す

投影面画像と指が曲がった状態のモーション画像の差分から生成する。そのため、投影面画像（現状の指の画像）とモーション画像（指が曲がった状態の画像）を生成する必要がある。

投影面画像生成においては、プロジェクタからの投影の影響を受けない赤外カメラでの撮影画像を使用する（図2(a)）。また、モーション画像生成においては、指のモデルを用いて曲がった状態の指をレンダリングした画像を使用する。具体的には、実際の指と同じ曲がり具合の指のモデルに対して投影面画像を投影テクスチャマッピングすることで投影面画像と同じ状況を作り出し、その上でモデルの指を曲げ、見せたい指の状態をレンダリングを行う（図2(b)）。その理由として、指には個人差が存在し、実際の指とモデルのテクスチャを正確に一致させることが難しいため、観察者が変わるたびにモデルを作り直す就非常にも手間がかかるためである。カメラ画像を指のモデルのテクスチャとして利用することで細かい個人差を考慮したモデルを必要としなくなる。ただし、投影領域の観点から指のモデルと実際の指のサイズ感は大まかに合わせておく必要がある。

これらの生成した投影面画像とモーション画像の差分を取り、投影できるように画素値を0~255に調整することで指が沈み込むように曲がって見える錯覚の投影画像（以後、指動作投影画像）を生成する（図2(c)）。この生成した指動作投影画像を Two-pass rendering によって実際の指領域に投影する。

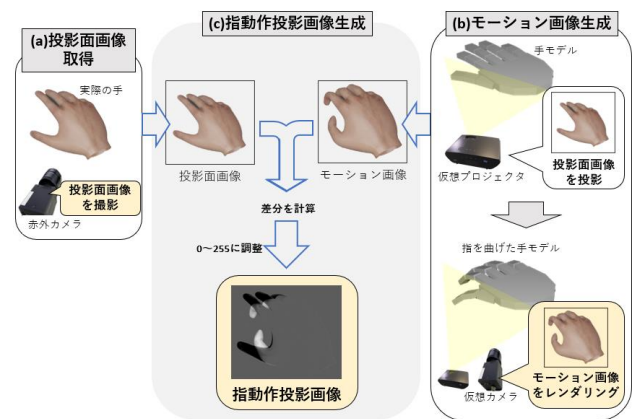


図 2: 指が曲がる動きのモーション画像生成プロセス

3.2 全体の投影映像生成プロセス

本提案手法では、物体の追跡として Morikuboら[1]の赤外カメラによる輪郭情報を利用した手法を用いる。また、指の正確な位置を取得する必要があるため、カメラベースのデバイスでは求める精度に達しないため本研究では指にマーカーを付ける光学式モーションキャプチャ（OptiTrack Flex3）を使用する。物体の追跡から投影に至るまでの本システムの全体の流れを図3に示す。流れとしては、投影対象物体を赤外カメラで撮影し、投影対象物体の輪郭情報か

ら位置姿勢を推定する。同時に指の追跡を行い、各関節の位置姿勢を推定する。指の位置と投影対象物体の位置から物理エンジンを用いて、接触の判定と投影対象物体の変形をシミュレーションする。接触した際に指の位置姿勢情報と赤外カメラの撮影画像から指動作投影画像を生成する。この投影対象物体の変形した画像と指動作投影画像をtwo-pass renderingを用いて実際と同じ位置姿勢の指と投影対象物体のモデルに合わせた投影画像を生成する。

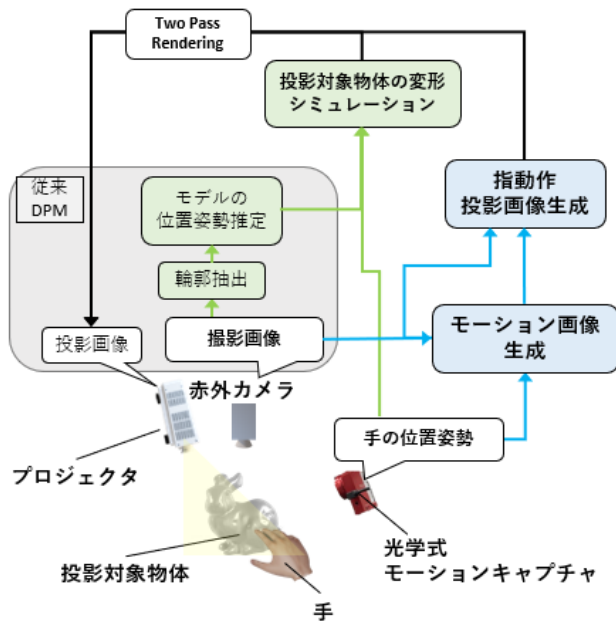


図 3: 全体のプロセス

4. 実装

本実装では、投影対象物体の追跡や投影面を撮影するための赤外カメラ (Ximea:MQ003MG-CM, 500fps) と投影用のプロジェクタ (ViewSonic:PX748-4K, 240fps) を投影対象物体の上部に設置する。また、指の追跡に関しては、察領域を囲むように光学式モーションキャプチャのカメラを配置し、指に再帰性反射マーカを付けることで指先と各関節の座標を取得する。マーカの付け方としては、光学式モーションキャプチャのマーカ検出の関係上、指先と第三関節にはマーカを1つ、第一関節と第二関節には関節を挟むように2つずつ付ける (図 4)。また、今回の実装では使用する指は人差し指のみとする。

投影対象物体の変形をシミュレーションするための物理エンジンとして、今回の実装では Bullet Physics を利用する。

指動作投影画像に関して、本実装では指に力を入れたタイミングで指動作投影画像を投影するのではなく、事前に作成したモーション画像を一定時間毎に投影し、指が曲がっているように見せる。指動作投影画像の生成に関して、3.1 で記載した生成結果を図 5 に示す。左上図が投影面画像、右上図が投影テクスチャマッピングを用いてレンダリ

ングしたモーション画像、下段が投影面画像とモーション画像の差分から生成した指動作投影画像 (左下が指を曲げたように見せていない場合、右下が指を曲げたように見せている場合) である。指動作投影画像は、モーション画像と投影面画像の差分を取っているため画素値として-255から255の値を取る。それを投影できるように0から255に調整するため、指の曲げがない場合は白色投影と投影なし (黒色投影) の中間的な明るさである灰色一色になる (図 5 左下)。図 5 右下の指動作投影画像では指が画像奥方向に曲がっている状態で、指領域で指のテクスチャがある部分で変化が出ていることが確認できる。

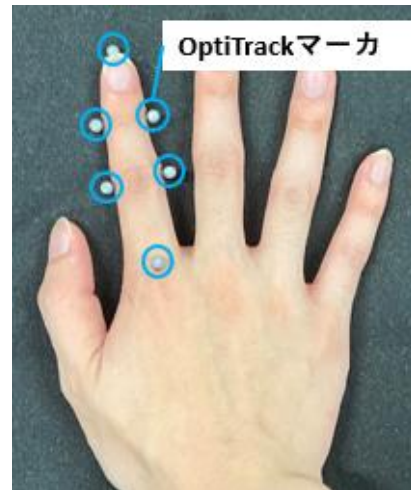


図 4: 再帰性反射マーカの設置

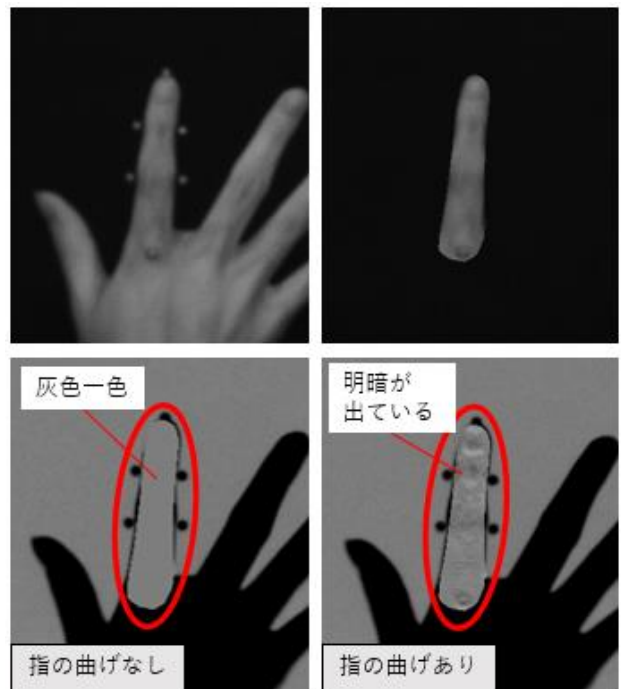


図 5: 生成画像 (左上: 投影面画像, 右上: モーション画像, 左下: 指の曲げなしの指動作投影画像, 右下: 指の曲げありの指動作投影画像)

5. 指が曲がる動きの効果確認

本稿では、3.1 で記載した指が曲がる動きを知覚させる投影画像生成により、生成した画像を投影することで指が物体方向に動いているように感じるかの確認を行った。生成した指動作投影画像を伸ばした状態で静止させた人差し指に対して投影し、その様子を見て指を曲げる動作の感覚があるかを確認した。投影の様子を図 6, 7 に示す。

図 6 は指の正面へ投影した様子であり、図 7 は傾けた指へ投影した様子である。また、それぞれの左図は指を変化させる前の状態、右図は指が曲がって見えている途中の状態である。投影を実際に観察した結果、指が奥方向に曲がっているように感じた。また、指が曲がるタイミングで指を曲げようという意識を持つことで物を押している感覚も確認した。



図 6: 投影の様子 (左: 変化前, 右: 変化中)

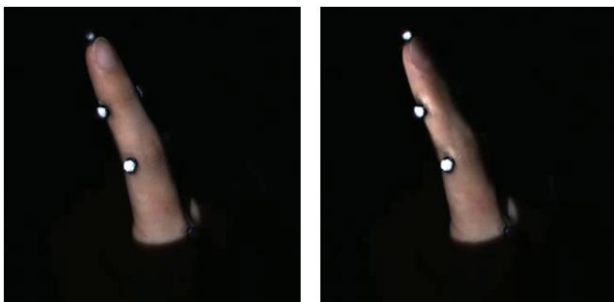


図 7: 傾いた指への投影の様子
(左: 変化前, 右: 変化中)

6. おわりに

本研究では、手で把持可能な動的プロジェクションマッピングにおいて、物体表面の凹みと指が物体へ沈み込むよ

うな動きを投影により表現することで、物体に触れた際に柔らかく感じさせる手法を提案した。また、その中から指の沈み込み投影の実装と、投影によって指が曲がっているように見えることを確認した。

今後は、物体表面が凹んでみえるような投影を組み込み、触った際に柔らかく感じさせられるかの検証を行っていく。

謝辞 本研究は JSPS 科研費 JP21K19789 の助成を受けた。

参考文献

- [1] Takashi Nomoto, Ryo Koishihara and Yoshihiro Watanabe, “Realistic dynamic projection mapping using real-time ray tracing”, ACM SIGGRAPH 2020 Emerging Technologies, No. 13, pp. 1–2 (2020).
- [2] Yuta Halvorson, Takumi Saito, Naoki Hashimoto, “Robust Tangible Projection Mapping with Multi-View Contour-Based Object Tracking”, Proc. of IEEE VR 2022 (VRW), pp. 756-757 (2022).
- [3] Takahiro Kawabe, Taiki Fukiage, Masataka Sawayama and Shin'ya Nishida, “Deformation Lamps: A Projection Technique to Make Static Objects Perceptually Dynamic”, ACM Transactions on Applied Perception, Vol. 13, Issue. 2, Article No. 10, pp. 1-17 (2016).
- [4] Yuki Ban, Takuji Narumi, Tomohiro Tanikawa and Michitaka Hirose, “Controlling Perceived Stiffness of Pinched Objects Using Visual Feedback of Hand Deformation”, 2014 IEEE Haptics Symposium (HAPTICS) (2014).
- [5] Parinya Punpongsonon, Daisuke Iwai, and Kosuke Sato, “SoftAR: Visually Manipulating Haptic Softness Perception in Spatial Augmented Reality”, IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, Vol. 21, No. 11, pp. 1279-1288 (2015).
- [6] Leo Miyashita, Kentaro Fukamizu and Masatoshi Ishikawa, “Simultaneous Augmentation of Textures and Deformation Based on Dynamic Projection Mapping”, SIGGRAPH Asia 2021 Emerging Technologies, No. 16, pp. 1-2 (2021).