

立体的織物文化財の多感覚デジタルアーカイブ

脇田 航

立命館大学情報理工学部

田中弘美

立命館大学情報理工学部

近年、多感覚情報を用いて文化財を多面的にデジタルアーカイブ化し、デジタル技術を用いて文化財をより効果的にみせるためのデジタルミュージアムに関する研究が注目されている。デジタルアーカイブの分野では、文化財を高精細にアーカイブ化し、再現することは重要である。そのためには、文化財の色や形、質感等を、見た目だけではなく触感等の多感覚情報を用いて多面的にアーカイブ化することが重要である。また、デジタルアーカイブ化された文化財をより自然な形で展示するには、多感覚情報を用いてリアルタイムかつ直接的に展示可能なインタフェースが必要である。我々はこれまで京都文化に焦点をあて、京都祇園祭のデジタルアーカイブに取り組んできたが、2011年度の祇園祭の後、船鉾収納庫の改修工事が予定されたため、これを機に本研究ではレーザーレンジスキャナによる大型の織物文化財の三次元計測システムの開発を行い、織物文化財の中でも立体的なものに絞って三次元計測を行った。本論文では、立体的織物文化財の三次元計測、モデル化、及び、リアルタイムかつ直接的に視触力覚提示可能な展示システムについて述べる。

A Multimodal Digital Archive of the 3D Woven Cultural Artifact

Wataru Wakita

College of Information Science

and Engineering

Ritsumeikan University

Hiromi T. Tanaka

College of Information Science

and Engineering

Ritsumeikan University

Recently, the research on the digital museum is drawing attention. In the field of digital archive, it is important to archive and exhibit the cultural artifact at high definition. To archive the shape, color and texture of the cultural artifact, it is important to archive and represent not only visual effect but haptic impression. Moreover, to exhibit the digital archived 3D cultural artifact naturally, a realtime and direct exhibition system by the multimodal information is necessary. We have worked on a digital archive of the Gion Festival in Kyoto, focusing on the culture of Kyoto. After the 2011 Gion Festival, the repair work of the Fune-hoko storage was scheduled. Therefore, we created a scanning system for the 3D woven cultural artifacts with the laser range scanner, and attempted the 3D measurement and modeling of the 3D woven cultural artifact of the Fune-hoko at high definition. In this paper, we describe a 3D measurement, modeling, and a realtime and direct VR exhibition system of the 3D woven cultural artifact.

1. まえがき

近年、文化財を多感覚情報を用いて多面的にデジタルアーカイブ化し、デジタル技術を用いてより効果的に提示するためのデジタルミュージアムに関する研究が注目されている。これらの分野において、文化財を高精細かつ高忠実に計測・モデル化し、再現することは重要である。そのためには、文化財の色や形、質感等を、見た目だけではなく触感等の多感覚情報を用いて多面的にアーカイブ化し、高精細かつ高忠実に再現する必要がある。また、超高精細にデジタルアーカイブ化された文化

財を CG や VR 技術を用いて高忠実かつ自然に再現するには、大規模なデータをいかにリアルタイムに処理し、直観的に提示するかが重要となる。デジタルアーカイブ化された文化財を多感覚で提示する研究として、接地型やエグゾスケルトン型の力覚提示デバイス及び CAVE ライクシステムによる展示システム [1][2]が存在するが、文化財を間接的にしか触ることが出来ない。一方で、接地型の力覚デバイスと HMD やハーフミラーを用いて直接的に多感覚提示可能なシステムがいくつか存在するが [3]~[5]、インタラクション可能な範囲が力覚提示デバイスの可動範囲内に限られ

てしまう問題がある。より自然に文化財を提示するためには、文化財の大きさも考慮した直接的な VR 展示システムが必要である。

我々はこれまでに京都文化に焦点をあて、祇園祭のデジタルアーカイブ化に取り組んできた[6]。その中でも、我々は 32 基ある山鉾の中の一つである船鉾懸想品を対象として、マルチバンド超高精細画像計測や三次元計測を行い、大規模なデータをリアルタイムに処理するために計測したデータをテクスチャベースで視触力覚モデル化し、ワイヤ駆動型力覚提示装置 SPIDAR[7]を用いて大型の立体的織物文化財に立体映像で直接接触することが可能なサイズ可変型の展示システムの開発を行ってきた[8]。

しかしながら、我々がこれまでの研究で使用してきた懸想品の三次元モデルは、レーザーレンジスキャナで 3 分割で計測したものに統合処理をかけて 1 つにしたものであり、懸想品表面の複雑な凹凸を表現するには解像度が足りないという問題があった。また、そのモデルは、細い円柱状の土台に十字型にクロスさせたアーム先端にレーザーレンジスキャナを下向きに取り付けるという非常に z 値（距離情報）に対して不安定な状態で、かつ土台を人力で動かしながら計測したものであったため、計測で得た複数のモデル間の距離情報のズレがひどく、モデルの表面勾配が滑らかではないという問題があった。

例年我々はこれらの懸想品の計測を山鉾巡行までの 1 週間ほどの期間に船鉾収納庫内で行っていたが、計測場所や時間等の制限もあり、これまでなかなか三次元測を再度行う機会がなかった。しかしながら 2011 年度の祇園祭の後、船鉾収納庫の改修工事が予定されたため、これを機に、本研究では大型の船鉾懸想品の三次元計測システムの開発を行い、船鉾懸想品の中でも立体的なものに絞って三次元計測を行った。本論文では、大型の立体的織物文化財の多感覚アーカイブとして、三次元計測システム、モデル化、及び、リアルタイムかつ直接的に視触力覚提示可能な展示システムについて述べる。

2. 大型立体的織物文化財の三次元計測

動く美術館とも呼ばれる京都祇園祭の山鉾巡行では、色鮮やかな装飾品等で飾られた 32 基の山と鉾が市内を練り歩く。山鉾に飾られる装飾品には金糸、木綿、ガラス、フェルト

等の様々な材料による色鮮やかな刺繍が施されており、質感も非常に複雑である。中でも、船鉾の懸想品の多くには綿が詰め込まれているため、非常に起伏の激しい立体的な構造となっている（図 1 参照）。山鉾巡行において船鉾が観覧席を通過する際に、このような立体的で複雑な構造や質感を直に目で確認することは困難である。また、祇園祭のハイライトの一つである宵山においては、このような立体的で複雑な質感をもつ懸想品を近くから眺めることはできても、手で直接接触することは出来ない。この為我々は、2011 年度の船鉾収納庫の改修工事を機に、装飾品の中でもとくに触ってみると面白そうな立体的な織物文化財に絞って三次元計測を行うことにした。



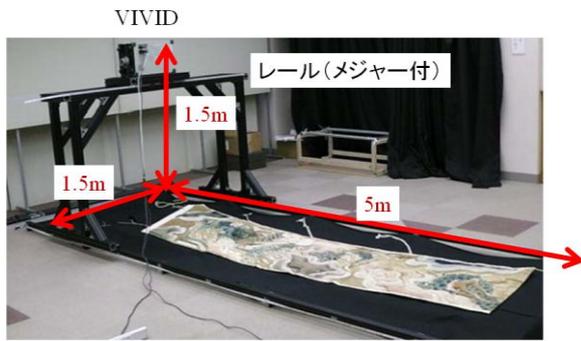
図 1. 船鉾と立体的織物

先に述べたように、懸想品は金糸やガラス、木綿、フェルト等様々な材料で構成されており、色鮮やかで立体的な刺繍が施されている。この為、レーザーレンジスキャナを単純に用いるだけでは、レーザー強度によっては部分的にしかデータが取れず、うまく計測が出来ない。また、懸想品の大きさもほとんどが 1m×3m 程の大きなものが多く、一度の計測で全体を計測することは出来ない。この為、分割して計測する際、撮影対象もしくはレーザーレンジスキャナの方向や両者の距離にズレが生じると、計測後の位置合わせ処理や最終的にデータを 1 つに統合する際に非常に手間が掛かることが予想される。

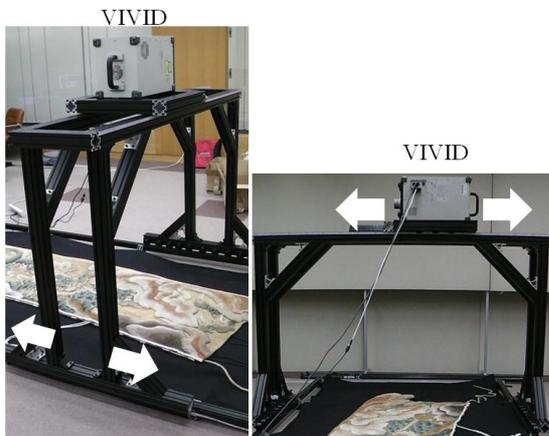
そこで本研究では、統合処理のしやすさを考慮したレーザーレンジスキャナを用いた大型の立体的織物文化財の三次元計測システムの構築を行った。

2.1. 三次元計測システムの構築

本研究では、三次元計測にレーザーレンジスキャナ（コニカミノルタ社製，VIVID910[9]）を用いた。VIVID910は1回のスキャンで最大640×480点（FASTモード：320×240，FINEモード：640×480）の距離データとカラー画像の計測を行うことが出来る。測定入力対象設置範囲は0.6～1.2m，レンズはTELE/MIDDLE/WIDEの三種類がある。本計測においては最も焦点距離の大きいTELEレンズを用いた。また，今回の計測では部材のような立体的なものではなく，平面的かつ表面が立体的な織物のみが対象であり，また，計測後の統合処理を出来るだけ簡略化するため，撮影対象を固定とし，VIVID本体を前後左右に動かしながら計測可能なシステムの設計を行った。図2(a)に構築した大型立体的織物の三次元計測システムの外観を示す。大きさは幅5m×奥行1.5m×高さ1.5m，計測範囲は大凡1m×4mで，船鉾懸想品の中でも一番大きな懸想品の大きさまで計測することが可能である。



(a) システム外観



(b) 2自由度のVIVID移動用の台車

図2. 大型立体的織物の三次元計測システム

床にはアルミフレームのレールが敷かれており，図2(b)に示すように，レールの上に車輪付きの台車を乗せ，台車の上にもVIVIDを乗せるための車輪付きの台車を設けることにより，VIVID本体を前後左右の2自由度で動かせるようにした。また，レール部分にはメジャーが貼り付けられており，メモリの値を記録しながら，台車を左右に20cmずつ，前後に15cmずつずらしながら計測を行った。

2.2. 三次元計測

計測はVIVID付属ソフトであるPolygon Editing Toolを介してリモートで行う。VIVIDを動かすたびにフォーカスを合わせ直してスキャンしていく。その際，レーザー強度をオートまたは手動で0～255の範囲で決めることが出来る。FASTモードの場合，スキャンボタンを押すと2～3秒ほどで計測が完了する。図3に1回のスキャンで得られたモデルを示す。

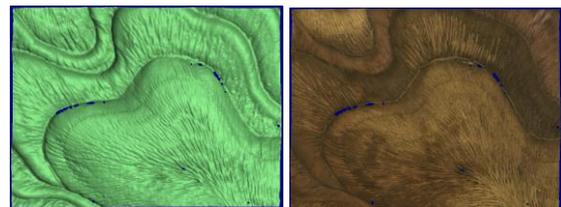


図3. 三次元計測結果（スキャン1回）

図3は材質が一樣なものであるため，1度のスキャンでうまく計測できているが，懸想品の多くは図4のように金糸や色合いの異なる木綿等による色鮮やかな刺繍が施されているため，材質に応じてレーザー強度を変化させないとうまく計測が出来ない。

図4はレーザー強度を7～220の範囲で17段階変化させて計測したものである。

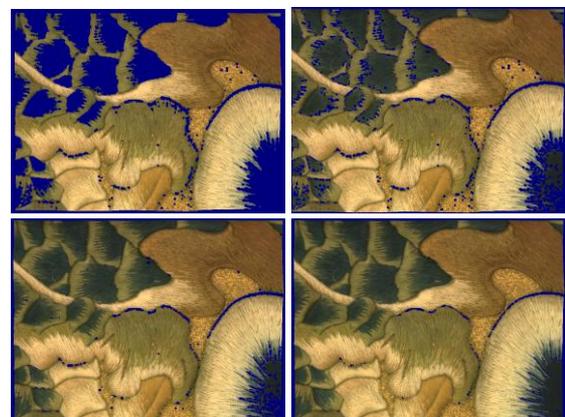


図4. 多段階レーザー強度による計測結果

金糸だけの部分はレーザー強度を 7~15 の範囲で 3~5 回程スキャンすると計測でき、紺色と白色が混ざっているような部分はレーザー強度を 30~220 程度の範囲で何度かスキャンするとうまく計測出来る。計測データはスキャン回数によってレイヤが増えていく。例えば図 4 のモデルの場合、1 つのオブジェクトに 17 個の離散的なデータが層状に重なった状態となっている。これに関してはモデル化においてレイヤを 1 つに統合する処理を行う。また、ところどころ穴があいている部分はレーザーが届かなかった部分（オクルージョン）、もしくは計測できなかった部分である。しかしながら、図 3 や図 4 で確認出来るような小さな穴程度であれば、モデル化において補間処理で埋めることで対処可能である。

以上の処理を VIVID の位置をずらしながら行っていく。図 5 に「下水引雲竜文様肉入り刺繍（西へサキ）」を計測した一部を示す。

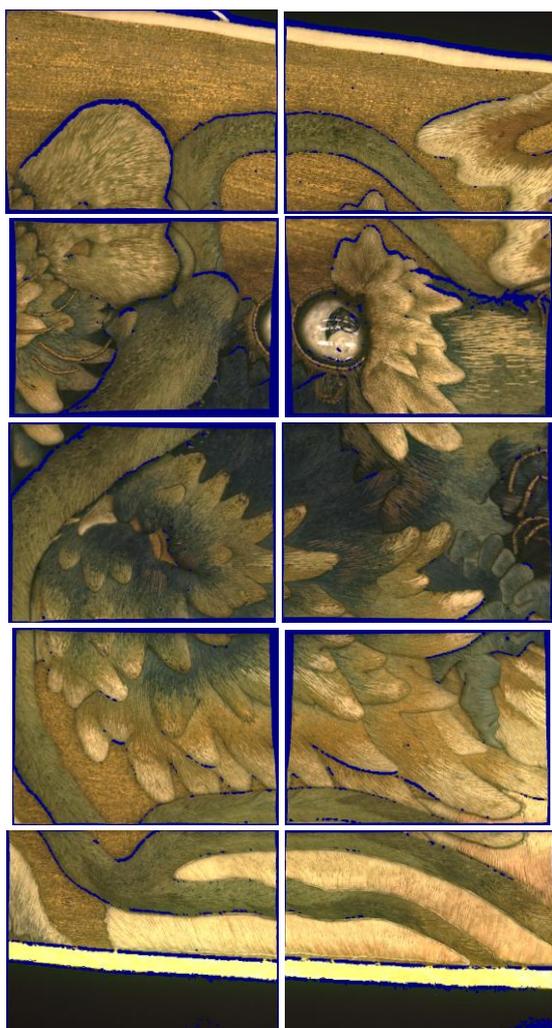


図5. 下水引雲竜文様肉入り刺繍（西へサキ）

尚、図5下の金色の部分には牛皮に金を練り込んだものであり、それが影響して、レーザー強度をいくら調整しても牛皮の上の木綿部分が計測出来ない問題があった。このような部分に関しては、牛皮部分を一旦黒色のフェルトで覆って木綿部分を計測したあとで、フェルトをはずして計測を行うとうまくいくことがわかった。このような場合、統合処理においてフェルト部分を削除しておく。また、図5で重複している部分は、モデル化において位置合わせをした後に統合処理をかけて1つのモデルに変換する。

3. 大型立体的織物文化財の三次元モデル化

3.1. 視覚モデル化

視覚モデル化の手順を以下に示す。まず前章で計測した多層モデルを1つに統合し、穴埋め処理を施し、金糸部分等で z 方向に大きくズレてノイズのようにになっている部分を除去して表面を滑らかにする処理を行う。

この処理が終わった後で、分割して計測して得たデータをそれぞれ1つのレイヤに統合したもの全てに対して同時位置合わせを行い、重複部分を除去して1つのモデルとして統合する。

図 6 に「下水引雲竜文様肉入り刺繍（東）」を手作業のみで位置合わせしたものを示す。図 6 のモデルは縦に 7 分割、横に最大で 18 分割の計 103 回に分けて計測を行ったものである。計測には、おおよそ 600 回のスキャンで 8 時間ほどを要した。現状、多層となっている部分を統合する処理、オクルージョンの部分を穴埋めする作業、金糸等の反射しやすい部分で z 値が乱れた部分を修正する作業等を行っていない。それでも手作業で位置合わせした際に図 5 に示すようにシームレスかつ高品質なデータを得ることが出来た。これにより、同時位置合わせ処理の際は、各モデルを回転させることなく、単純平行移動のみで位置合わせをすればよいことがわかる。図 6 のモデルをきちんと統合処理をかけた場合、画素数としてはおおよそ 3000 万となる。



図6. 下水引雲竜文様肉入り刺繍（東）

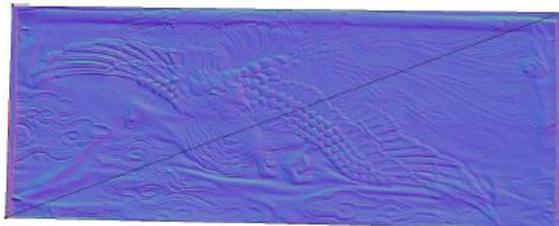
3.2. 触力覚モデル化

リアルタイムに触力覚提示を行うには、視覚提示にかかるコストも考慮しつつ、1kHzの更新レートの確保が必要である。対象物体がきめ細くなるにつれ、指先と仮想物体との衝突判定にかかるコストをいかに抑えるかが問題となる。また、三次元モデル表面のポリゴン数が増えるにつれ、力の途切れ、不連続な力の発生、振動が多発するといった不具合が生じやすくなるため、少ないポリゴン数でいかに高精細な触力覚提示を行うかが重要となる。

そこで本研究では、これまでに我々が提案したテクスチャベースの力覚提示手法[10]を用いて三次元触力覚モデル化・提示を行うことにより、リアルタイム性の確保及び高精細な提示の実現を行う。図7は三次元計測で得られたレンジデータをもとに高さ情報と勾配情報に分けて二次元画像化したものである。



(a) 高さマップ



(b) 法線マップ

図7. 触力覚モデル

ここで、図7(a)は表面の高さ情報が格納された高さマップである。高さマップはグレースケールで、白い部分ほど表面が高く、黒い部分ほど低い。また、図7(b)は表面の勾配情報が格納された法線マップである。表面の勾配を表す三次元ベクトルXYZの値がRGB値で格納されている。織物文化財は全体として平面的なものであるため、ポリゴンリダクションをかけると長方形の簡単な形状に落とし込むことができ、また、凹凸情報をテクスチャとしてマッピングすることにより、少ないデータ量のモデル化が可能となる。

4. 展示システムへの応用

我々はこれまでに、より直観的かつインタラクティブに文化財を展示するためのインタフェースとして、立体映像に直接接触することが可能な多感覚展示システムの試作を行ってきた[10]。図8に試作した展示システムを示す。

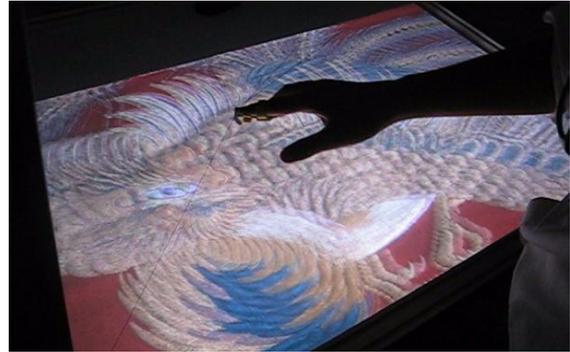


図8. 立体的織物文化財の直接的視触力覚提示システム

立体的織物の文化財を床に置いた状態と仮定し、プロジェクタと鏡を用いて立体映像を下部のスクリーンから背面投影し、立体映像に直接接触するために、スクリーン上部に糸ベースの力覚提示装置 SPIDAR を配置する。力覚提示の際、指先とモデル表面との接触判定を行い、交点に対応する高さマップに応じて表面高さを動的に変更し、法線マップの画素値に応じて反力方向を摂動させることにより、少ない計算量で高精細な凹凸を力覚表現することが出来、リア投影された立体映像の上から SPIDAR で直接文化財を触る感覚が表現できる。現状このシステムでは形状変形は考慮していない。硬さや摩擦感をテクスチャベースで表現可能であるが、文化財そのものは直接接触したりすることが困難であるため、いかに硬さや摩擦といった触感を計測・モデル化するかについては今後の課題である。

5. 考察

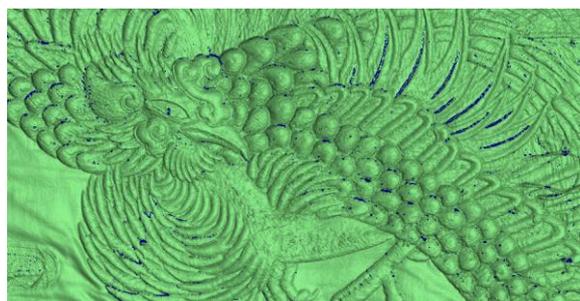
図9に、これまでに使用してきたモデルと、今回の計測で得られたモデルとを比較したものを示す。以前のモデルに比べ、z方向へのノイズが少なく、表面が滑らかであることが見て取れる。これまでに使用してきたデータと今回の計測で得られたデータの解像度数を比較すると、大凡10~11倍ほど高精細なモデルを獲得することが出来た。

現状、今回の計測で得られたモデルの統合処理が終わっていないため、展示システムへ

組み込むことができていない。力覚提示のアルゴリズムは、低ポリゴンモデルに対してUV座標を計算するだけであるため、テクスチャベース化してしまえば計算量が増加する心配はない。しかしながら、法線マッピング等のテクスチャベースのレンダリング手法では表面の凹凸感（とくに輪郭）を視覚情報で表現することは困難であるため、3000万画素相当の形状モデルをいかにリアルタイムに視覚処理するかについては今後の課題である。



(a) 従来使用していたモデル



(b) 今回の計測で得られたモデル

図9. 形状モデルの比較結果

6. あとがき

本研究では、立体的織物文化財の三次元計測、モデル化、及び、リアルタイムかつ直接的に視触力覚提示可能な展示システムについて述べた。今回、2011年度の祇園祭終了後の船鉾収納庫の改修工事を機に、装飾品の中でもとくに立体的な織物文化財に絞って三次元計測を行ったが、現状、統合処理や穴埋め処理等をきちんと行っていない。また、今回の計測において、これまでに使用してきたモデルに比べて非常に高品質な三次元データを得ることが出来たが、頂点数が数千万相当のものとなっているため、展示システムにおいていかにリアルタイムに処理するかについては今後の課題である。また、懸想品のモデルをつなぎ合わせると船鉾側面で6m程となるため、より自然かつ効果的に見せるためのインタフェースの実現も今後の課題である。

7. 謝辞

今回の三次元計測は、財団法人祇園祭船鉾保存会の協力により実施された。また本研究の一部は、文部科学省平成22年度「デジタル・ミュージアムの展開に向けた実証実験システムの研究開発」事業及び文部科学省科学研究費補助金若手研究(B) (課題番号23700152)の一環として実施されたものである。

参考文献

- [1] C. Christou, C. Angus, C. Celine Loscos, A. Dettori, and M. Roussou, "A Versatile Large-Scale Multimodal VR System for Cultural Heritage Visualization," Proc. ACM symposium on Virtual Reality Software and Technology (VRST 06), pp. 133-140, Limassol, Cyprus, 2006.
- [2] M. Carrozzino and M. Bergamasco, "Beyond virtual museums: Experiencing immersive virtual reality in real museums," Journal of Cultural Heritage, vol. 11, no. 4, pp. 452-458, 2010.
- [3] M. Inami and N. Kawakami, D. Sekiguchi, Y. Yanagida, T. Maeda, S. Tachi, "Visuo-Haptic Display Using Head-Mounted Projector," Proc. IEEE Virtual Reality 2000, pp. 233-240, 2000.
- [4] G. Bianchi, B. Knoerlein, G. Szekely and M. Harders, "High precision augmented reality haptics," Proc. EuroHaptics, pp. 169-168, 2006.
- [5] C. Sandor, S. Uchiyama, and H. Yamamoto, "Visuo-Haptic Systems: Half-Mirrors Considered Harmful," Proc. WHC 2007, pp. 292-297, 2007.
- [6] H. T. Tanaka, K. Hachimura, K. Yano, S. Tanaka, K. Furukawa, T. Nishiura, M. Tsutida, W. Choi, and W. Wakita, "Multimodal Digital Archiving and Reproduction of the World Cultural Heritage "Gion Festival in Kyoto", " Proc. VRCAI2010, COEX, Seoul, Korea, Dec. 2010.
- [7] 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," 信学論(D-II), vol.J74-D-II, no.7, pp.887.894, Jul. 1991.
- [8] W. Wakita, K. Akahane, M. Isshiki, and H.T. Tanaka, "A Realtime and Direct-touch Interaction System for the 3D Cultural Artifact Exhibition," LNCS, Vol. 6774, pp.197-205, Jun. 2011.
- [9] <http://www.konicaminolta.jp/instruments/products/3d/vivid910/>
- [10] W. Wakita and S. Ido, "A haptic rendering for high polygon model using distance map and normal map," IPSJ Journal, vol.49, no.8, pp.2509-2517, Jul. 2008.