

特集 ■ 第 14 回大会

特別講演 2

Applications of 3D Digital Technologies in Archaeology and Digital Heritage



查 紅彬
Hongbin Zha

北京大学

皆さんこんにちは、ご紹介いただきました中国北京大学の查と申します。私の話のタイトルは考古学とデジタル文化財における 3 次元デジタル技術の応用です。二つの部分からなっています。まず最初に 3 次元デジタル技術についての説明で、デジタル文化財のバックグラウンドとしての 3 次元デジタル技術とはなにか、基本的な処理プロセスの中にどのようなことを考えないといけないのか、今の課題はなにかについて簡単に説明します。その次に、3 次元デジタル技術は文化財にどのように応用されるかについて紹介します。主に中国で行われている二つのプロジェクト、つまり龍門石窟と麦積山石窟における応用例について説明します。今回の話は、技術的な詳細についてではなく、中国で行われている事例について報告するという性格が強いです。

1. 3 次元デジタル技術

まず、3 次元デジタル技術の概念ですが、ある小さい彫像を対象として計算機の中でそっくりなものをつくるというのは少し乱暴ですが簡単な例であります。似ている例としてコピー機があります。コピー機の場合は 2 次元の資料の複製をつくるのですが、今言っているのは 3 次元の実世界に存在する 3 次元の対象物体を何らかの技術を使って計算機の中でそのモデルをつくる、そっくりなものをつくるというものを指しています。実物というより計算機の中で何らかの形で蓄積したようなデータを取りたいという感じです。

そのようなことをやるためには現実的にどのような目的を達成しないといけないかというと、まず大事なのは幾何学的な情報を集めないといけないのです。細かく分けると二つの部分を含んでいます。まず、ある物体のモデルを作ろうと思ったらその表面のすべてをカバーしな

ければいけません。次には、モデル表面の形状的、構造的な詳細あるいは変化をちゃんと記述できなければいけないということです。この 2 点は、幾何学的なモデリングの中で非常に大事なことです。ただ、幾何学的な情報だけではなく、他の情報もモデルの中に付加することができれば非常に役に立ちます。例えば、テクスチャーやカラーあるいはその透明度や他の特性の情報を入れることです。今日では、基本的に最初の部分、つまり幾何学的な情報をいかに集めるか、いかに利用するかに重点をおいて話を進めていきます。

3 次元幾何モデリングはずっと昔からやり始めています。コンピュータビジョンの中、おそらく 20～30 年前からモデリングという話がずっと話題になっています。ただ現在からみると、どのような特殊な問題が出てくるかといいますと、いろいろな要求の面でだいぶ違ってきています。例えば、今のモデリングの対象は単体ではなく、複雑なトポロジカルな構造を持っているものが多いです。しかもそれに加えてダイナミックな変形や動きというものを含めています。人間の体あるいは、屋外情景の中にはたくさんの変化するものができます。また、インターネットで使うためには、そのデータをいかに削減するかあるいは圧縮し、転送するかなどを含めて考えなければいけません。もう一つ大事なのは、昔はモデリングができれば非常に役に立つということでコストをあまり考えていませんでしたが、現在では実際の応用に使うためには、できるだけ低コスト、はやい速度で作らなければいけないということで、自動的にモデルを作りたいということも大事なポイントになっています。

動かないものについては大体成熟した技術があるのですが、植物あるいは建物のように複雑な構造を持つものだとすると簡単にはいかないです。また、人間の

顔のように変形するあるいは動いている人間や動いている車のようなものまで考えますと非常に難しいです。私たちの研究室にしてもそのような3次元実物体のモデリングについての研究をだいぶ前からやっていたのです。しかし、現実世界とバーチャル世界との間の壁をいかに打ち破るかということはかなり難しい問題として存在し続けています。

その一方で、3次元モデルがあれば、医療やロボティクスなど様々な分野で使用できるので、バーチャルリアリティの研究は大きな期待をされています。当然、ミュージアムや文化財のところでそれを使おうという動きも出てきます。文化財のことを考えますと、3次元デジタル技術が役に立つということは直感的にわかると思います。実は、文化財のところで文化財の保護と展示というところで大きな矛盾を抱えています。文化財を保護しようとした時、どこかに安置し、鍵をかけて閉めておけば一番単純です。しかし、文化財に関する知識を普及させようとしてみると、展示しないといけない。展示することになると何らかの形でみんながアクセスできる形になってしまうので損害を与える可能性が非常に強いです。しかし、もし3次元デジタル技術を使えば、実物をどこかに保存しておき、実物のデジタルコピーを作り、デジタルコピーを展示すればよいというのが自然な考え方です。

まだ、複雑なことを考えますと、考古学や文化財の中で、いろいろな使い方があります。先ほど申しましたデジタルコピーをつくるのは一つの使い方ですし、それと同時にばらばらに破損した状態で発掘された文化財を計算機の中でバーチャル的なテクニックを使い、修復するというのも試されています。また、計算機上で修復した文化財を解析して、歴史上どのようなことがあったかなどの解析を行うというのも応用の一つです。例えば、ある発掘された頭蓋骨から顔を復元することで、それがどのような時代の人間か、どのような顔をしているかを知る手助けができます。もう一つの応用例としては、発掘現場の3次元モデリングです。発掘とは一瞬前の発掘現場を破壊することで行っていきますので、一度作業を行ってしまうと、元の発掘現場の様子を調べることができません。実際に中国ではたくさんのそのような現場が存在します。現在では発掘せず、そのままおいたほうが安全であるという対策も行っています。しかし、もし3次元技術や他の物理的、科学的な方法を用いて発掘現場を記録しておけば、発掘後に元の発掘現場を調べることが可能です。

次には、このような目的のためにはどのような処理

プロセスが必要になるかを考えていきたいと思います。今では、ほとんど同じパイプラインを使い、モデリングをやっています。データを取る装置としてはレーザースキャナや他の光学的な原理に基づいたスキャナを用いています。実際にはそれらの装置を用いてデータをとると、一方向のデータしか取れないのでいくつかの視点からデータをとり、組み合わせて用います。しかし、組み合わせるところでは簡単にはいかず、データの中のノイズを除去して対象面を再構成し、レジストレーションという位置合わせをし、最終的には同一の座標系において接続するという過程になります。そうすることでモデルが出来上がります。さらにいろいろな応用に関しては、粗い解像度を持つモデル、細かい解像度を持つモデルが必要になりますのでそのようなデータ形式にあわせて用意します。

その中にはいくつかの問題点があります。まず出てくるのがデータをいかに取るかということです。現在使われている3次元スキャナの例はいくつもあるのですが、これらの中には近くからデータを取れるものもあれば、遠いところからデータを取れるものもあります。だいたい近くからデータを取るものはステレオビジョンの原理に基づいたものが多く、遠いところのデータを取るものはレーザ光が飛行する距離を測るような装置が多いです。今回の会場の展示場でも様々なタイプのスキャナが展示されており、みなさんの注目を集めていると思います。今でも、普通のデジタルカメラのように簡単に使えて、しかも3次元データを高密度にとれる機材の開発は期待されています。最近では、そのような技術も実用化されてきており、日本では3次元カメラも発売されており、来年には3次元テレビが発売される予定になっていますので今後もますます注目される研究領域になっていくと思います。

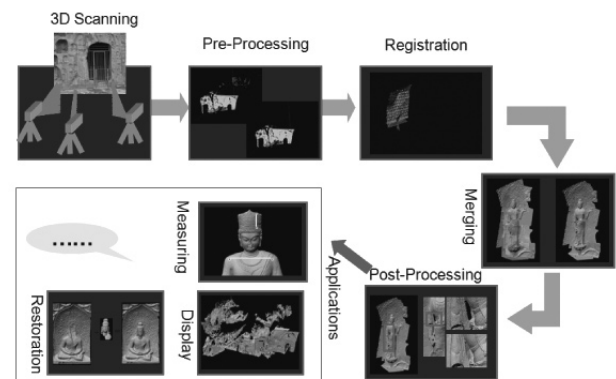


図1 デジタル文化財における3次元モデリングの基本処理パイプライン
* 口絵にカラー版掲載

ここでもう一度、データ処理のところの難しい問題点について、2点ほど申し上げます。まず最初には、今取れる3次元データの形式は非常に特殊であり、処理するときに非常に使いにくい。今までよく使われている音声や画像やビデオなどを考えますと大体信号の配列がきれいになっています。このように整列された信号に関してはフーリエ変換やウェーブレット変換などのツールを簡単に使うことができます。しかし、3次元データの場合、対象物体自体が複雑であり、しかも採ったデータ自体が不規則に並べられていますので先ほどの音声などには使えるツールを使うのは難しいです。その意味で、新しい処理方法を開発することが必要となります。

もう一つの問題としては、データの規模が非常に大きいことです。対象物体が簡単な構造であったとしても精度を高くデータを取ってしまうと、すぐにギガビット程度の情報量になってしまいます。建物全体や屋内空間の3次元モデルを作ろうと思ったらそのデータの規模はさらに膨大です。そのようなデータをいかに処理させるかということもGPUなども含めて新しい技術を考えているところです。

2. 文化財における3次元デジタル技術の応用

私たちの研究室においては実際の文化財の中で、そのような3次元データを採り、処理をしてモデルまで作りあげた上でさらに処理を加えるという応用について行ってきました。いままでの中国の国内での研究例としては、北京原人の頭蓋骨に関して3次元モデルを作り解析したこともありますし、他に北京以外のところでもたくさんの石窟や発掘現場において3次元デジタル技術を使おうと活動しています。本日は龍門石窟と麦積山石窟における応用例を紹介します。

2.1 デジタル龍門石窟プロジェクト

まずは、龍門石窟に関する共同研究、応用についてです。これに関しては4,5年くらい前から始めました。後にも述べますが、考古学分野の研究者と共同研究をしようとするとき、お互いの興味を理解しあうのは出発点です。最初から話し合い、少しずつ理解しあって相手の考え方を知るまでのプロセスが非常に時間がかかります。そのようにして5年前から始めたのですが、次に示すいくつかのことについて進めています。一つはコンピュータでとった3次元モデルを用いて線画を作ることです。もう一つは計算機内での仏像の復元です。石窟の中には仏像がありますが、その一部分がすでに盗まれて流出

してしまっています。流出された部分の一部は在り処がわかっており、中国に戻されています。ただ戻されていても、実物の体の上に接続して修復することはできないため計算機の中で壊された各部分のモデルを作ってバーチャルに復元することもやっています。三つ目の仕事については3次元モデリングに用いるソフトウェアの標準化です。いろいろなところで違う方法で3次元モデルをつくってやっているのですが、統一した技術標準がないと、技術とデータ自体の蓄積ができません。その考えに基づいて、去年から3次元デジタル技術の標準化について研究を始めています。

そのようなことを進めるにつれて龍門石窟側も非常に興味を持ってくれて大々的にしましょうということで今年から5年間から10年間かけて龍門石窟を3次元デジタル化しようという話になりました。

ここでは、最初にもどってどのようなことから始めたかについて説明いたします。最初にやったのは測量とマッピングのために使える方法の開発です。考古学あるいは石窟のところではその物体の表面の特徴のある曲線を図面にするという仕事が非常に重要です。考古学の報告書というものがあのですが、それには写真と文字がたくさん使われています。しかし、その二つに加えて線画、スケッチというものが非常に大事です。場合によっては一つの報告書の2/3ぐらいが人間の書いた線画になっていると聞いています。しかし、今まで現場における線画の作成方法を見ますと、かなり手作業のような仕事をやっています。ロープとかを使ってベースラインを引いてグリッドをつくって測ります。測れない大きなものになりますと目測で図面を書いています。もちろん写真はありますが、ここでは使えません。写真は中央透視で出てきたものですから変形があるので、そのような変形の無いような平行投影した図面が必要となります。もし、3次元デジタル技術を使えば、まず3次元データを採り、モデリング化した後平行投影した画像が出てきます。そのような画像を使えば、簡単にスケッチを描くことができます。私たちから見れば非常に簡単なことなのですが、しかし考古学者から見ても非常に役に立ちそうと感じたようです。

このようなことを最初にやりました。使っているスキャナは4種類ありまして、そのうち二つは小型の対象物のデータを採るときに使うもので、残りは100mくらいの距離でデータを採るとき使っています。そのデータ処理の流れは以下の通りです。まず、データを採ります。いろいろな視点からデータを採り、前処理を行います。

例えば、データからノイズを除去して対象面を再構成します。その後は、そのデータのある共通の座標系の中に持っていき、レジストレーションを行います。このレジストレーションが非常に難しいです。今使える方法の中には、人間がまったく介入せず、完全に自動化した方法はたぶん無いと思います。何らかの条件や拘束を加えないと自動的に行うのは非常に難しいです。さらに、データを同じ座標系に持っていったときに起こる微妙なずれや違いを消去しなければならないし、データが取れなかった“穴”部分に関して何らかの方法で埋め込まないと行かないです。そのようにしてモデルが出来上がって平行投影の画像を作り出すことができます。そうすると考古学者はその上から描けば線画ができます。

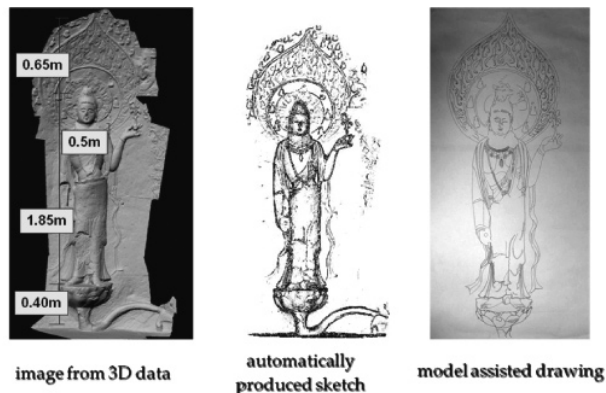


図2 3次元データを用いた線画自動抽出と描画

この方法を使う利点は幾つかあります。まず、このようにすると精度が上がります。まだデータを採るのに時間がかかるのですが、線画を書くこと自体は非常に早いですし、ゆがみが無いです。もう一つ大事なことはいろいろな切断面を作れることです。そのため切断面から見た線画を作ることも簡単です。さらには、20～30mの大きさを持つ場所の線画を一度に書くことも試しました。それはやれるのですが、人間がそのような大きな対象の線画を書くのはなかなか難しいです。また、次のようなところでも役に立ちます。中国の昔からの石窟では中が非常に暗く、色が全部変わって見えます。だから、目で見るとほとんど同じ色に見え、形状の変化が見えないです。しかし、3次元データを使うとそのような形状の微妙な変化も現れてきますのでそのような形状の微妙な変化も表すことができます。

結果がどうかということの評価しなければなりません。そこで、わりと大きいサイズの20mくらいの広さ

で8.5mの高さでその間に三つの石窟があるのですが、その壁のところでは線画を作りました。それを伝統的なやり方でやろうとすると480時間ほどかかると予測されます。今の方法で使いますと8時間でモデリングを行い、24時間でそれを元に線画を描けました。そうすると単純計算で448時間が節約になりました。この結果について、いろいろな考古学者の間で意見を聞いていると、特に若い研究者が時間の節約になるので非常に喜んでいますが、考古学者が1週間、1ヶ月の間ずっと一つのところを見て線画を描くというのは線画を描くという結果だけでなく、ずっと見る、細かく見る、そして考えること自体が研究プロセスの一部分です。そうすることによって、普通見えないものが見えてくるのではないかと非常に面白い考え方です。

ここで一つの疑問が出てきます。3次元のモデルから生成される画像があれば、それから自動的に抽出したエッジを使えるのではないかと私なりに考えています。そこで、二つを比較してみました。自動的に抽出した線画と考古学者が書いた線画ではかなり違ってきます。こういう図面に関して考古学者はどこが大事であるか、どこが大事でないかという知識がありましてそれを図面の上に表現するためにある部分の線を追加したり、消したりしています。そのような専門家の知識を線画抽出アルゴリズムに組み込めないかという考え方もありますが、現在の技術では難しいです。ただ、計算機で生成した図面は考古学者が言っている線画ではなく、別のタイプの線画になりえます。計算機で生成した線画はそれなりの特徴があるので将来は新しいタイプのデータとして報告書の中に入れてもいいのではないかと考えています。このプロジェクトについては、近い将来にその報告書が出版される予定です。その出版される報告書の中の線画の大部分はこの手法を使って描かれています。このような3次元デジタル化の過程で得られたデータをDVDとして一緒に出版しようという話になっています。もしそのようなことになったら、考古学者たちによれば世界で初めてではないかという話のようです。

次に話すのは、仏像の体の一部を計算機の中でバーチャル的に修復することについてです。具体的な例としては、頭の部分は外国から持ち込まれ、体の部分に関しては現地で発見されたものについて、それを両方ともデータを使って一緒に接続しました。技術的には簡単な

ことですけれど考古学者たちにとってはばらばらになっていた部分が完全な体になったということで非常に役に立ちます。もちろんこの接続の方法には考古学者たちの間で様々な議論がありますが、コンピュータを使えば、いろいろなバージョンを作ることができて、サンプルを提供することができます。

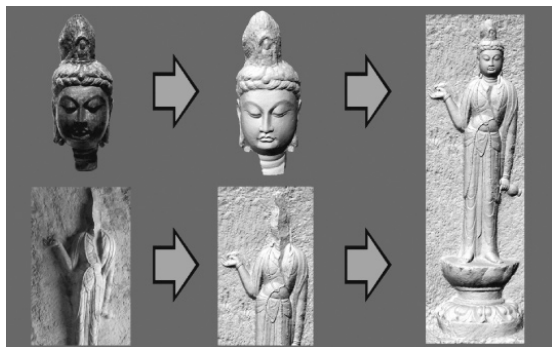


図3 佛像のバーチャル修復（龍門石窟）
* 口絵にカラー版掲載

2.2 麦積山石窟における応用例

これは司会の矢野先生がさっき紹介しましたように何年前から凸版印刷と早稲田大学が始めたプロジェクトです。北京大学は途中で参加して、3次元データの収集からモデリングまでの作業を担当しました。このプロジェクトの目的はデジタル文化財のところで使える新しい3次元モデリング、レンダリングあるいはディスプレイやインタラクション技術を開発しようということです。そのケーススタディとしては、麦積山石窟の123号窟の3次元モデルを作り、そしてそれを映像化して、ビデオを作り、しかも3次元的にディスプレイできるような形にまで持っていきます。最終的には3次元的に人間が操縦できるようなインタラクションを持っているような映像まで持っていくのが目標です。



図4 麦積山石窟の3次元データに基づいて生成した映像

3. 終わりに

最後に、今日の話をもとめたいと思います。まず、3次元デジタル技術は文化財のところで非常に役に立つということがはっきりわかっています。文化財の保存、研究および知識の普及に対して非常に大事な技術の一つです。ただ、何かやろうと思ったら非常に難しい問題も含まれています。つまり、違う分野の人が一緒に仕事をしないといけないということは難しいです。しかも、実際に使うのは我々ではなくて、その考古学者、文化財の研究者ですので、彼らのはっきり役に立つと認識しないところがいくらなにやっても最終的な目的にはなりません。

そのようなことを成功させるために次のようなことは重要である。一つは目標を明確にしないといけないということです。やっていることは両方ともはっきり認識しているところまで話し合わないで最終的にははずれてしまいます。もう一つはきれいな結果を作らないといけません。私たち研究者は研究の際にその目的にあった結果であればいいと思ってしまうのです。しかし応用する側から見たら十分きれいな、彼らを感動させるような結果が出てこないと続けるのは難しいです。三つ目には、本当に役に立つことをやらないといけないです。先ほど説明した線画を書くことやバーチャル的に修復するとかは我々から見るとそんなに技術的には難しい課題ではないです。しかし、できたら彼らの役に立つと思ったら双方とも情熱を持って続けてやっていきます。

次に、このような応用的なことをしながら、その中で問題を見つけてそこから基礎研究にもなれるようなことを探し出すのも大事なことだと思います。この辺のバランスをよく考えないといけないことです。難しいところではあります。

質問者：モデリングまでの話のご説明があったと思いますが、モデリング、スキャニングにしていく過程で例えば、表面のマテリアルだとかそれから再現するためのレンダリングのための技術が必要になってきて、また研究した開発したというエピソードはございますか。

査：今私たちがやっていることは、まず3次元データを採って、また同時にカメラを使ってカラー画像を採ってその後テクスチャーマッピングをするといった流れです。研究課題としては何人かの学生がそれについて研究しているのですが、しかし本当にきれいなものを作りあげようとしたら研究用のアルゴリズムではなかなかうまく

くいかないで一部分は手作業で調整する必要があります。例えば、ある部分の色に関しては計算機の自動選択より、人間の目で見ただけのほうがはるかに合うんですが、そのように難しい点だったら人間からのインタラクションで一番良い結果が得られるようにしています。

質問者：同様に撮影者のライティングとかそういったものは問題にはなりませんか。

査：それはいろいろ考えています。適切にライティングを設定して画像を撮る角度もあるのですが、それは経験によるところが大きいです。

質問者：関連して石窟の場合ですと狭い空間が多いと思いますが、適切なスキャナを選ぶとかスキャナのスキャン精度が足りないとかそういうことはありますか。

査：あります。例えば、麦積山で行った例ですとまず割とレンジの長いレーザーファインダを使うのですが、それはデータとして必要になるのではなく、全体の構図として必要になります。そうすると粗い精度で採ってしまいます。その後各部分に関して近距離のスキャナを使って採っていきこうとします。最終的には前に採った構図があるので、それに貼ればよいというようなことをやっています。ただ、仏像の頭の後ろとかはなかなか採れないのですが、その部分に関しては手作業で埋めているんですね。そのようなところで使えるスキャナがなかなか見つからないですし、いろいろなスキャナも使わないといけません。そこで、先ほども言いましたように龍門石窟でやっている3番目の仕事が技術標準化です。標準化というのは、データの形式とかだけでなく、使えるスキャナの種類、精度、組み合わせ方がその標準化の中に考えないといけないと思っています。

質問者：表面に見えるものだけが石窟のすべてではないということだと聞いていたのですが、今表面の話がされていたと思いますが、その下の層についてはどのようにアーカイブされていますか。

査：対象物内部の計測は今まで考えていません。だから、今使っているのはレーザースキャナですので表面しか採れないです。中の状態を見となるとCTスキャナとか他のスキャナを使わないといけませんし、別の話になってしまうと思います。昨日か今日の日本の新

聞を読んでいたら、何らかの文化財でCTスキャナやX線スキャナを使って内部までデータを採っているという発表がありました。

質問者：先ほどの映像の中でレーザーレンジファインダを使っているというご紹介がありましたが、それと同時にプロジェクターとカメラの二つを使った方法を使用していると思ったのですが、どちらをどのように使い分けていたのでしょうか。

査：近距離と長距離ということは先ほど申しましたように、全体の状況把握のためには長距離を使い、もっと精密にとろうと思ったら近距離のファインダ、スキャナを使います。しかし、構造光とレーザーのそれぞれを使った2種類のスキャナを使用していますが、それは色によって使い方が違います。例えば、石窟の中には黒い部分がたくさんありましてレーザーの精度は悪いんですが、その場合は構造光を使うようにしています。

質問者：さきほど内部のデジタルアーカイブ化の質問がありました。学術フロンティアで早稲田大学の河合隆史教授がいるんですけども内部を見るようなことも研究されているようで、中国でやられているかはわかりませんが、そのようなものと組み合わせるとできるかもしれないと思った次第です。

【略歴】

査 紅彬 (Hongbin Zha)

Hongbin Zha received the BE degree in electrical engineering from the Hefei University of Technology, China, in 1983 and the MS and PhD degrees in electrical engineering from Kyushu University, Japan, in 1987 and 1990, respectively. After working as a research associate at Kyushu Institute of Technology, he joined Kyushu University in 1991 as an associate professor. He was also a visiting professor in the Centre for Vision, Speech, and Signal Processing, Surrey University, United Kingdom, in 1999. Since 2000, he has been a professor at the Center for Information Science, Peking University, China. His research interests include computer vision, digital geometry processing, and robotics. He has published more than 200 technical publications in journals, books, and international conference proceedings. He received the Franklin V. Taylor Award from the IEEE Systems, Man, and Cybernetics Society in 1999.