

フォースフィードバックを伴う形状入力デバイスの開発

木 梨 伸 悟[†] 杉 崎 裕 一[†]
金 尾 裕 彦[†] 三 浦 憲 二 郎^{††}

本研究では、フォースフィードバックを伴う形状入力デバイスと開発と、そのデバイスの利用を前提としたソフトウェアシステムの開発を目的とする。近年のコンピュータハードウェアの進歩により、より計算機パワーを必要とするソフトウェアが安価に利用できるようになり、CAD や CG などの形状モデリングを行うユーザ層が拡大している。専門知識を持たないユーザにとっても直感的に形状モデリングができるように、本研究では、パラレルリンク機構の特性を利用した形状モデリングデバイスの設計・製作と力覚提示を用いた形状モデリングソフトウェアの開発を行った。本研究で製作したデバイスは、3次元の位置、姿勢の入力、および操作者に対し形状モデルの変形時における抵抗等の力覚情報を提示する。形状表現には point-based geometry を用い、従来のポリゴンモデルでは不可能であった、複雑な形状に対するリアルタイムの形状操作を可能とする。

Development of a Geometric Modeling Device with Force Feedback

SHINGO KINASI,[†] YUICHI SUGISAKI,[†] HIROHIKO KANAOKI[†]
and KENJIRO T. MIURA^{††}

The purpose of the research described in this paper is to develop a geometric modeling device with force feedback and a software system by use of it. Recently, thanks to the advancement of computer hardware, software demanding high processing power has been available at relatively low cost, that has been expanding the ranges of geometric-modeling users for CAD and CG. In order to enable users without expertises to model geometric objects, we have designed and manufactured a geometric modeling device based on parallel link mechanism and modeling software system with force feedback. The developed device can render haptic information such as resistance force produced by cutting operations as well as input its 3 dimensional position and orientation for the user. We have adopted point-based geometry to represent objects and made it possible to do set-theoretical operations on complicated objects, that is not possible for polygon-based geometry.

1. はじめに

近年、コンピュータを利用した3次元形状モデルは、工業製品の設計だけでなく、医療やエンターテインメント等の多くの分野で利用されている。しかしながら、人間がイメージした形状を、形状モデルとして具体化しそれを変形するという、いわゆる形状モデリング技術の進歩は充分とは言えない。現在、モデリング作業において、マウス、およびキーボードを用いた数値入力方式が一般的に用いられているが、直感的な操作性

に欠け、3次元の形状入力にはあまり適していない。形状モデリングにおいて、より良い操作性を持つインターフェイスの開発が望まれている。

本研究では、VR(Virtual Reality)空間での形状モデリングを目的とし、フォースフィードバックを伴う形状入力デバイスを開発するとともに、形状を point-based geometry を用いて表現したモデリングシステムを提案する。

2. 関連研究

2.1 ハプティックデバイス

ハプティックデバイスとは、操作者に触覚を提示するデバイスであり、このデバイスを使用することにより、操作者は3次元空間の物体に触れ、その感触を得ることが可能である。現在、ハプティックデバイスとして様々な機構が考えられ、分類すると以下となる。

[†] 静岡大学大学院理工学研究科
Graduate School of Science and Technology, Shizuoka University
^{††} 静岡大学工学部機械工学科
Department of Mechanical Engineering, Shizuoka University

- 道具媒介型
- ワイヤテンション型
- グローブ型
- 接触型

道具媒介型はペンやハンドル、あるいは球状の把持部を媒介として反力を感じるタイプである。ロボットアームの形状をしたデバイスが多く、DC モータを用いて反力を発生させている。入力は x, y, z の位置 3 自由度に、各軸周りの回転 3 自由度を加えた 6 自由度が一般的であるが、出力は位置の 3 自由度のものや、回転も加えた 6 自由度のものまで様々なデバイスが提案されている。

ワイヤテンション型は手や指に直接糸を装着し、この糸を引っ張る際の張力により反力を発生させる。このタイプのハプティックデバイスとしては、佐藤等が開発した SPIDAR¹⁾がある。SPIDAR は、親指、人差し指、中指、および薬指の 4 本の指に糸を装着し、各指に対する反力を発生させる。

グローブ型は、手にグローブを装着して指を曲げると、指関節の曲がり度合いに応じて反力が発生する。グローブには関節の曲がり度合いを検出する位置センサとワイヤが取り付けられており、指の曲げ度合いに応じた力でワイヤを引っ張ることにより、反力が発生する。

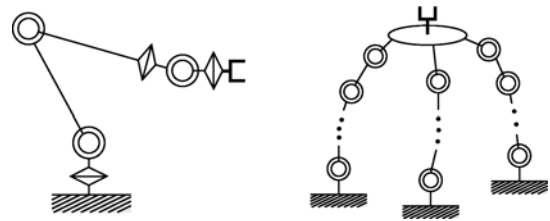
以上のハプティックデバイスは基本的に何かを把持したり、あるいは装着したりすることにより反力を発生させるものだが、接触型デバイスは、人間の指で直接対象物に触れることにより、物に触れた感触（いわゆる触覚）を提示する。Iwata 等が開発した FEELEX²⁾が代表的なデバイスとして挙げられ、医療分野における触診のシミュレーションなどに応用されている。接触型デバイスは、リアルな触覚を提示可能ではあるが、操作者からの情報入力は困難であり、形状モデリングへの応用は考え難い。

現在、Sensable Technology 社の PHANToM など、シリアルリンク機構のマニピュレータを応用したハプティックデバイスが一般的に使用されている。一方、静止リンクから出力リンクまでが複数のリンクで並列に連結されたパラレルリンク機構が 3 次元測定器などに広く利用されており、シリアルリンク機構に比べて高速、高精度、高出力、高剛性という特徴を有する。本研究では、パラレルリンク機構の特徴を活かした、形状モデリングのためのハプティックデバイスを提案する。

2.2 パラレルリンク機構

現在、ロボットマニピュレータには、大別するとシ

リアルリンク機構とパラレルリンク機構の 2 種類が存在する。図 1(a) に示すようにシリアルリンク機構は、複数のリンクを直列に結んだ開ループ機構となっている。一方、パラレルリンク機構は、静止リンクと出力リンク間を複数のリンク機構により並列に結合し、駆動させる閉ループ機構となっている。機構の特徴の比較を表 1 に示す。



(a) シリアルリンク機構 (b) パラレルリンク機構

図 1 機構のイメージ図

表 1 機構の比較

特徴	パラレルリンク機構	シリアルリンク機構
アクチュエータ	並列	直列
発生力	大	小
動作領域	小	大
逆運動学	容易	困難
順運動学	困難	容易
精度	誤差が平均化	誤差が累積

シリアルリンク機構は、マニピュレータとして広く用いられ、一般的に使用されている機構である。しかし、この機構では、一番根元のアクチュエータが、それより先のリンク、およびアクチュエータの全重量を支えなければならず、運動性能に制限を与えている。また、位置誤差の累積による精度の低下も問題となる。一方、パラレルリンク機構は、すべてのアクチュエータを固定部に配置することが可能であり、可動部を軽量化することができる。さらに、位置誤差の累積がなく、シリアルリンク機構と比べると高精度である。また、各アクチュエータの出力が加算されるため、高出力を実現できる。

形状モデリングデバイスに使用する場合について考察を行う。形状モデリングにおいて、正確なモデルを作成するためには高精度な位置入力が必要である。したがって、形状モデリングデバイスとして使用するには、位置誤差の累積が生じるシリアルリンク機構に比べ、パラレルリンク機構の方が適しているといえる。また、形状モデリングデバイスは、大掛りな設備ではなく、デスクトップ上で使用可能な小型のものが望ま

れる。したがって大きな作業範囲は必ずしも必要ではない。パラレルリンク機構は動作領域が狭いという欠点が存在するが、形状モデリングデバイスとして使用する場合は問題にはならないと考えられる。

さらに、パラレルリンク機構の可動部分は軽量である。リアルな触感を提示するため、ハプティックデバイスは、理想的には、デバイスを装着していない状態に可能な限り近づけ、機構の透明性を高めることが求められる。したがって、優れた操作感覚を実現するためにはデバイスの可動部分は軽量であることが不可欠であり、この点においてもパラレルリンク機構の方が優れているといえる。

パラレルリンク機構は高出力であるため、シリアルリンク機構を用いて同じ出力を得る場合に比べて、使用するアクチュエータは低出力のものでよい。したがって、アクチュエータのコストを下げるのが可能であり、結果としてデバイスのコストを下げるができる。以上のことから、パラレルリンク機構は形状モデリングデバイスに適していると考えられる。

パラレルリンクマニピュレータの典型的な構造は図2に示すスチュワートプラットフォームである。スチュワートプラットフォームは、エンドエフェクタが6本の長さを調節できる直動アクチュエータによって支えられた構造をしており、小型で、高出力なマニピュレータとなっている。このスチュワートプラットフォームをハプティックデバイスとして用いる研究も行われている。しかし、この機構は、直動アクチュエータの摩擦が大きいため、エンドエフェクタを外部からの力で動かすことが困難であり、バックドライバビリティ（エンドエフェクタの運動の可逆性）が欠如するという欠点が存在する。したがって、ハプティックデバイスとして用いた際、機構透明性を実現することが非常に困難である。また、可動範囲も小さい。

スチュワートプラットフォームの他には、ヘキサ型とデルタ型がよく知られている。図3、図4にそれぞれの機構を示す。ヘキサ型は6個のアクチュエータと球対偶で結ばれたリンクで構成され、6自由度の機構となっている。デルタ型は、3個のアクチュエータによって駆動し、並進3の自由度を有する。

パラレルリンク機構を用いたハプティックデバイスとして筑波大学の Haptic Master が良く知られている。Haptic Master は6自由度のマニピュレータであり、3つのパンタグラフ機構から構成されるパラレルリンク機構を用いて、操作者の手先に反力を提示している。駆動には、9個のモータが使われており、冗長駆動による汎用的な使用が可能となる反面、コスト

が高くなっている。形状モデリングでは姿勢に対する出力は不要と考えられ、6自由度すべてが必要というわけではない。そこで、本研究ではデルタ型パラレルリンク機構をハプティックデバイスに応用した形状入力デバイスを開発し、3個のモータで3自由度の力覚出力を実現した。また、3自由度の位置入力、2自由度の姿勢入力が可能である。

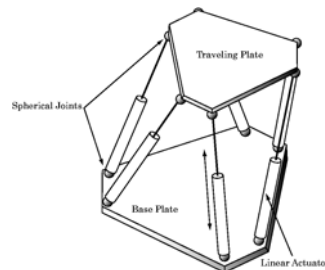


図2 Stewart Platform

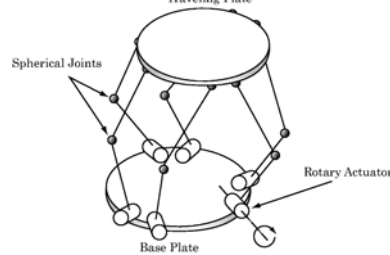


図3 ヘキサ機構

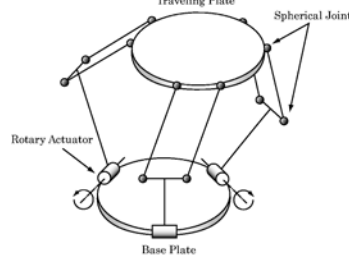


図4 デルタ機構

2.3 Point-based geometry

CGでは一般的にポリゴンが表示要素として用いられているが、近年、点を表示要素とする point-based geometry と呼ばれる新しいレンダリング手法が提案されている。ポリゴンは描画する際に面の接続情報が必要だが、point-based geometry の点要素は、他点との接続を考慮する必要がなく、複雑なオブジェクトを高速にレンダリングすることが可能である。しかし、点と点の隙間をどのように埋めるかが大きな問題であり、様々な手法が提案されている。Grossman と Dally⁴⁾ は、pull-push と呼ばれる点群の描画手法を提案している。この手法は最初に、穴が存在する画

像から、低解像度の穴が埋まった状態の画像を生成する。そして、低解像度の画像を参照することにより、元の画像の穴の開いている部分を埋めるという手法である。

Rusinkiewicz と Levoy は QSplat⁵⁾ と呼ばれる手法によって、3次元計測器によって得られた大量の点群データを描画する方法を提案している。Qsplat は多重解像度表現が可能なデータ構造によって視点から見える点群を効率よく検索し、必要な部分のみを描画することにより、高品質なグラフィックスを高速に生成している。Zwicker ら⁶⁾ は surface element (surfel) を用いたレンダリングを提案している。surfel は点の位置、法線、色情報、半径などによって定義される描画要素を示す。surfel を描画するために平板 (Splat) を用い、4角形や円などの形状を点の代わりに描画している。

これらの手法を用いることにより、複雑な形状においても高速にレンダリングすることが可能となる。しかしながら、point-based geometry の形状を編集するという課題も残っている。Adams ら⁷⁾ は surfel で定義されたオブジェクト同士のブール演算の手法を提案している。高速な surfel の内外判定を行うことにより、対話的にブール演算の結果を確認することができる。本研究では、Adams の手法を利用し、surfel で定義されたオブジェクトを変形させ、モデリングを行う。

3. システム概要

本研究で開発した形状モデリングシステムの概要を、図5に示す。本システムは、3次元の位置、姿勢入力、および力覚の出力が可能な形状モデリングデバイス、デバイス制御のためのコントロールボックス、コンピュータ、および形状モデリングソフトウェアから構成される。

操作者は、デバイスを用いて VR 空間上のポインタを自由に動かし、モデリング、ペインティングを行うことができる。その際の、切削抵抗やペインティングの感覚をデバイスを介して感じる事ができ、直感的な操作を可能としている。

4. 形状モデリングデバイス

本研究では、パラレルリンク機構であるデルタ機構を用いた形状モデリングデバイスを開発した。並進 (x, y, z) 方向3自由度の位置入力、力覚出力が可能である。また、株式会社 NTN により開発された広角アクティブリンク機構を用いて2自由度の姿勢入力を可能としている。広角アクティブリンク機構の概略図を

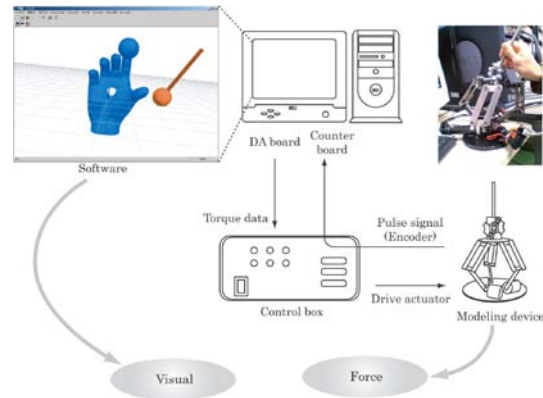


図5 システム概要

図6に示す。デバイスの大きさは、約 $216 \times 216 \times 320[\text{mm}^3]$ で、作業空間は $140 \times 140 \times 100[\text{mm}^3]$ である。広角アクティブリンク機構の概略図を図6に示す。

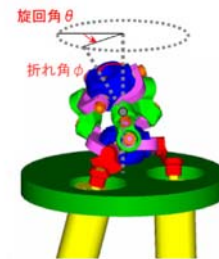


図6 広角アクティブリンク機構 概略図

自然な入力感を得るためには、デバイスの可動部分は軽量であることが望ましく、リンクやトラベリングプレートにはジュラルミン (比重 2.8) を使用した。さらに、入力感への可動部分の自重による影響を減らすため、常に自重を支える方向に力を発生させている。また、各リンクの関節 (18箇所) にはベアリングを取り付け、滑らかな動作を実現した。図7(a)~図7(b)に様々な姿勢におけるデバイスの状態を示す。

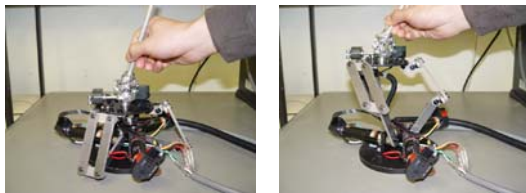
操作者はデバイスに取り付けられたペン部分を把持して形状入力を行う。人間が指で触れる感覚に比べ、ペンなどの物を介して触れる感覚の方が、容易に再現できる。そのため、ペン型の把持部を用いて力覚提示ポイントをペン先の一点に絞ることにより、より高い現実感を得ることができる。

本研究で開発した形状モデリングデバイスは、3個のDCサーボモータ、5個のロータリーエンコーダを搭載している。デバイスからコンピュータへの位置、姿勢の入力はロータリーエンコーダを用いて行う。各

軸の回転角はパルス信号としてコンピュータの PCI バスに搭載されたカウンタボードに入力し、このパルス数をカウントすることにより回転角を検出する。

位置入力部のデルタ機構には maxon motor 製のロータリーエンコーダ HEDS5540(500[パルス/回転])を用いている。このエンコーダは、減速比 21:1 のギアヘッドが取り付けられた DC サーボモータの軸に取り付けられている。減速比を考慮すると、回転軸周りの分解能は 0.034[°/パルス] となる。姿勢入力部には、株式会社ムトーエンジニアリング製のロータリーエンコーダ UN1000(1000[パルス/回転])を用いている。軸周りの分解能は 0.36[°/パルス] である。

反力提示は、3 個の DC サーボモータを用いて行う。コンピュータに搭載された DA ボードより ±5[V] の任意のアナログ信号を DC サーボアンプに入力することにより、DC サーボモータへの供給電圧を制御し任意のトルクを得る。本研究では DC サーボモータ RE25(maxon motor, 定格出力 20[W], 公称電圧 18.0[V], 停動トルク 218[mNm])を使用した。



(a) 姿勢 1 (b) 姿勢 2

図 7 様々な姿勢における形状モデリングデバイス

5. ソフトウェアシステム

本研究では、point-based geometry を用いて定義された形状に対してモデリング処理、ペインティング処理を行う。point-based geometry とは、位置や法線、色情報を持つ点 (surfel) を表示要素としたレンダリング手法である^{3)~6)}。

5.1 モデリング処理

工具オブジェクト (tool) とモデリングオブジェクト (work) の 2 つのオブジェクトに対し、ブール演算を行うことによって形状モデリングを行う。差のブール演算では、オブジェクトの切削を、また和のブール演算では粘土を追加して形を作り出すようなモデリングが可能となる。

処理手順は以下のようになる。

- (1) 前処理として surfel で定義された形状に対して八分木を構築する。
- (2) tool, work に対して内外判定を行い、相手のオブジェクトの内側、外側のどちらに存在しているかを示す属性をすべての surfel に与える。
- (3) 内外判定の結果の属性に従って、surfel の追加・削除を行う

手順 2 の内外判定には Adams⁷⁾ の手法を用いる。手順 2, 3 を繰り返すことにより、対話的にモデリングを行う。切削モデリングの場合、手順 3 において、work の「内側」属性の surfel を除去し、tool の「内側」属性の surfel を work に追加することにより、モデリング後の形状を作成することができる (図 8)。操作者に対し、切削抵抗を力覚情報として提示することにより、直観的なモデリングが可能である。

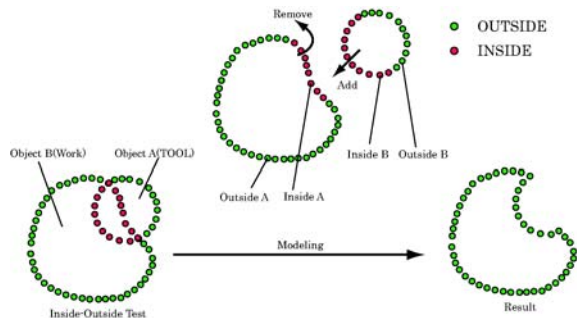
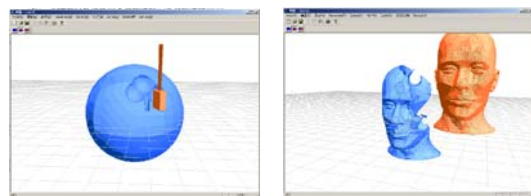


図 8 切削モデリング



(a) モデリング例 1 (b) モデリング例 2

図 9 モデリング処理

5.2 力覚提示

力覚提示は、オブジェクトの変形を伴うモデリング時と、変形を伴わない非モデリング時の 2 つの場合を考える。モデリング時の力覚提示は、切削体積に比例した力と、速度に比例した力を提示する。point-based geometry において体積を扱うことは困難なため、除去

する surfel の数を切削体積とみなして計算する。非モデリング時は、オブジェクトにめり込んでいる surfel の数に比例した力と、速度に比例した力の提示を行う。力の大きさは次式で表される。

$$|F| = k_p N + k_v |v| \quad (1)$$

ここで、 N は surfel の数、 v は工具オブジェクトの速度、 k_p, k_v は定数とする。

提示する力の方向については、めり込んでいる surfel の法線ベクトルの平均をとり、そのベクトルの方向を提示方向としている。速度による力は、工具オブジェクトがモデリングオブジェクトにめり込んでいる間中、常に提示していると、外に出て行く方向に工具オブジェクトが動いた際に、この動きを制限する。したがって、ワークオブジェクトにめり込む方向の速度成分だけを抵抗力として反力に加える。図 10 において、めり込む方向 ($x_2 - x_1$) の速度は考慮するが、外に出て行く方向 ($x_3 - x_2$) の速度は反力計算に入れない。

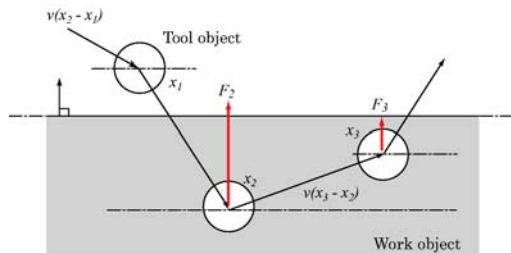


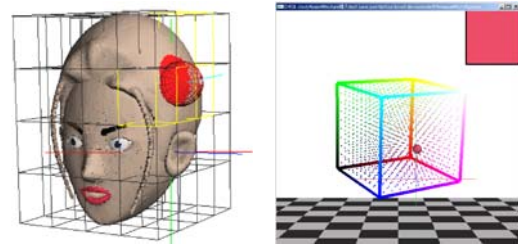
図 10 力覚提示

5.3 ペインティング処理

ペインティング処理 (図 6) では、オブジェクトに対して任意の色を塗ることや、テクスチャの貼り付けを行う。デバイスの 3 次元位置入力の利点を用いた 3D カラーパレット (図 6(b)) などの 3 次元ユーザインターフェイスを用いて、容易に操作可能である。また、力覚提示により、オブジェクトの形状を把握し、3 次元形状に対して直感的に色情報を付加することができる。

6. おわりに

本研究では、パラレルリンク機構を用いた形状モデリングデバイスを開発し、優れた力覚提示が可能となった。また、3 次元形状のモデリング、およびペインティングを行うソフトウェアを開発し、デバイスを用いて操作することによって、直観的に 3D キャラクターの作成が可能なシステムを開発した。



(a) 操作画面

(b) カラーパレット

図 11 ペインティング処理

謝 辞

株式会社 NTN には広角アクティブリンク機構をご提供いただきました。感謝いたします。本研究の一部は、平成 15 年度科学研究費補助金基盤研究 (C)(15560117) の助成による。

参 考 文 献

- 1) 平田幸広, 猿渡基裕, 佐藤 誠, モータ駆動による力覚生成能力を持つ空間インターフェース装置の提案, 電子情報通信学会技術研究報告, HC91-2, 9/14, 1991.
- 2) Hiroo Iwata, Hiroaki Yano, Fumitaka Nakaizumi, Ryo Kawamura : Project FEELEX: Adding Haptic Surface to Graphics, In Computer Graphics (Proc. SIGGRAPH2001), pp.469-475, ACM Press, New York, 2001.
- 3) M. Levoy and T. Whitted. The Use of Points as Display Primitives. Technical Report TR 85-022, The University of North Carolina at Chapel Hill, Department of Computer Science, 1985.
- 4) J.P. Grossman and William J. Dally. Point sample rendering. In Proc. 9th Eurographics Workshop on Rendering, pp. 181-192, 1998.
- 5) Szymon Rusinkiewicz and Marc Levoy. Qsplat: a multiresoliton point rendering system for large meshes. In Computer Graphics (Proc. SIGGRAPH 2000), pp. 343-352. ACM Press, New York, 2000.
- 6) Hanspeter Pfister, Matthias Zwicker, Jeroen van Baar, and Markus Gross. Surfels: surface elements as rendering primitives. In Computer Graphics (Proc. SIGGRAPH 2000), pp. 335-342. ACM Press, New York, 2000.
- 7) Bart Adams, Pilip Dutre, Interactive Boolean Operation on Surfel-Bounded Solids. In Computer Graphics (Proc. SIGGRAPH 2003), pp. 651-656. ACM Press, New York, 2003.