

トラックボール型 3D マウス ParRot の提案と評価

西村 陽向^{1,a)} 高橋 伊織^{2,b)} 成瀬 宏亮^{3,c)}

概要：本研究では、3D モデリング作業の効率化と直感的な視点操作を実現するため、トラックボールを用いた低価格な 3D マウス「ParRot」を提案する。既存のジョイスティック型 3D マウスは高価かつ習熟に時間を要するという課題があるのに対し、ParRot はトラックボールの回転量を直接カメラ操作に反映し、視点の回転・並進をボタン切り替えによって明確に分離することで、初心者でも素早く直感的に扱える設計とした。さらに、ユーザがファームウェアを再コンパイルすることなくショートカット割り当てを変更できる Web アプリケーションや、Autodesk Fusion 向けのアドインなど、周辺ソフトウェアを含むエコシステムを構築した。評価実験としてアンケートや操作時間測定テストを行った結果、特にモデリング初心者において SpaceMouse やマウス&キーボードよりも迅速かつ正確な視点調整が可能であることを確認した。本稿では ParRot の設計・実装および評価実験の結果を報告し、今後の改良点や拡張の可能性について議論する。

1. はじめに

近年、工業製品の設計においては 3DCAD などの 3D モデリングソフトが一般的に使用されるようになった。また、VR・AR 分野の拡大により、3D モデリングは設計・製造業だけでなく一般ユーザにも広がりを見せている。さらに 3D プリンタの普及に伴い、個人が気軽に 3D モデルを作成する機会が増え、3D モデリングが趣味やプロダクト制作の一環として行われるようになった。

この流れに対応する形で、3D モデリングを補助する左手デバイスとして「3D マウス」が一般ユーザにも浸透し始めている。代表的な例として、3Dconnexion 社のジョイスティック型 3D マウス「SpaceMouse」などが挙げられる。3D マウスは、通常であれば右手のマウスで行う視点操作を左手に任せることで、モデリング作業を効率化する役割を果たしている。

一方、現在普及している 3D マウスにはいくつかの問題が存在する。

- 代表例である 3Dconnexion 社「SpaceMouse」の価格は 2 万円以上と高額であり、初心者や個人ユーザにとって導入のハードルが高い。
- 事実上の競合製品が少なく、ユーザが 3D マウスを選

択する際に実質的な選択肢がほぼ存在しない。

- ジョイスティック型デバイスである SpaceMouse は 6 軸同時操作が可能な反面、操作習熟に時間がかかり、視点移動の精度や直感性に欠ける場合がある。

本研究では、これらの問題を解決するため、低価格かつ直感的に操作可能な 3D マウス「ParRot」と、それを支えるソフトウェア環境を含むエコシステムを提案する。ParRot はジョイスティック型 3D マウスが抱えていた操作の難しさを解決するためトラックボールを用いた新しい入力方式を採用し、視点回転だけでなく平行移動やショートカット入力など多様な操作を可能にする。ハードウェア自体の材料費は約 1 万円と抑えられ、市場のエントリーモデルよりも低価格で作成できる。Blender・Autodesk Fusion の操作に対応しており、今後対応ソフトの拡充も予定している。特に Autodesk Fusion では、視点操作やオブジェクト移動をサポートするアドインを開発している。また、ショートカットキーやボタン配置をユーザが自在にカスタマイズできる Web アプリケーションも提供する。ユーザ層はモデリングソフトのライトユーザを想定し、デバイス・CAD ソフトウェア・ユーザインターフェースがシームレスに連携する環境を実現する。

本論文では、私たちの問題感を共有したのち、ParRot のハードウェア設計・実装について述べ、続いて Fusion360 アドインおよび Web アプリケーションの設計概要を説明する。その後、既存の 3D マウス「SpaceMouse」との比較テストを通じて操作性や視点移動の精度を評価し、本エコシステムの有用性と市場への影響について議論する。

¹ 東京電機大学 未来科学部 ロボット・メカトロニクス学科

² 筑波大学 情報学群 情報メディア創成学類

³ 東京科学大学 工学院 電気電子系

a) 22fr087@ms.dendai.ac.jp

b) s2210016@u.tsukuba.ac.jp

c) naruse.h.aa@m.titech.ac.jp

2. 先行事例

3D マウスの先行事例としてまず挙げられるのは、3Dconnexion 社の SpaceMouse シリーズである [1]。ジョイスティック型のデバイスであり、ノブの押し込み・引き・回転といった操作を通じて三軸の並進運動および三軸の回転運動を同時入力できる。SpaceMouse シリーズは事実上のデファクトスタンダードであり、競合製品がほとんど存在しない。価格はグレードによって 2 万円～5 万円と高額で、個人ユーザにとっては導入ハードルが高い。こうした価格面・製品選択肢の問題が、本研究のモチベーションの一つとなっている。

トラックボール型の 3D マウスとしては GlobeFish が先行事例として存在する [2]。トラックボールの回転による視点回転は ParRot と同様であるが、並進操作はトラックボールの押し込みによって行う点が異なる。また、GlobeFish のテストでは操作の精度や効率に重点が置かれていたが、本研究の ParRot は「習熟の速さ」や「直感性」にフォーカスしている点も異なる。なお、GlobeFish は試作段階で開発が終了しており、市場で入手することはできない。

類似のトラックボールデバイスとして Kensington の SlimBlade もある。これはボールの回転を三軸で取得し、接地面に対する垂直方向の回転を画面のスクロール量として利用する [4]。ただし、主用途はスクロールやカーソル移動であり、3D モデリング用途には最適化されていない。

3. 提案手法

3D マウスは、3D モデリングソフトの操作において視点操作やショートカットを左手に割り当てることで、モデリングをより効率化することができるデバイスである。しかし、現状の 3D マウスにはいくつかの問題がある。

まず、並行移動操作や回転操作を行う際に入力データと視点移動が一致しない点である。ジョイスティック型 3D マウスは、カメラの回転や視点移動など複数の軸での同時操作が可能である。しかし、ユーザが求める「回転位置への移動」と、デバイスが扱う「角度の傾き」「速度データ」が一貫しないため、正確な操作が難しい。

具体的には、視点のある方向に回転させたい場合、ユーザは回転角度を意識して操作を行う。一方でジョイスティックが出力するのは「回転の角速度」であり、その速度はジョイスティックの傾け具合（角度）によって決定される。そのため、視点を目的の位置で正確に止めるにはユーザが傾ける角度を微調整しながら速度を制御する必要がある。わずかに手がブレたり戻すタイミングが遅れると、視点が行き過ぎるといった問題が生じ、目的の方向を向くまでに時間がかかってしまう。

次に、ジョイスティック型 3D マウスでは、視点移動や回転といった複数の操作が 6 軸（X, Y, Z の平行移動およ

び回転）で同時に行える仕様となっているが、この仕組みがデバイスに習熟するまではかえって誤入力を招くことが多いという点である。これにより、視点調整に余計な時間を要し、かえって作業効率が低下する可能性が高くなってしまう。

また、既存の 3D マウスは価格が高く、市場における選択肢が限られているという問題も存在する。現在、3D マウス市場は 3Dconnexion 社の SpaceMouse シリーズが事実上独占しており、エントリーモデルでさえ 2 万円以上という価格設定になっている。プロフェッショナル向けモデルでは 5 万円を超えるものもあり、初心者や個人ユーザにとって導入のハードルが非常に高い。市場には SpaceMouse 以外に選択肢がほとんど存在しないため、3D マウスを検討するユーザは価格面で妥協するか、導入自体を諦めるしかないのが現状である。

まとめると、現状の 3D マウスの問題点として以下の 3 点となる。

- (1) 操作が難しく、習熟に時間がかかること
- (2) 3D マウスを選ぶ際に、SpaceMouse 以外に選択肢がほとんど存在しないこと
- (3) SpaceMouse は一番安いグレードでもからと、導入の障壁となること

これらの問題を解決するため、トラックボール型 3D マウス ParRot を提案する。

3.1 トラックボール型 3D マウス ParRot

3D マウスを用いた視点操作をより直感的にするため、トラックボール型入力装置を用いた 3D マウス、ParRot を提案する。トラックボールを用いて、現実のトラックボールの回転量がそのまま 3DCAD 内のカメラ動作に直結することで、3D モデルを手元で回すように回転操作を行えるようになる。従来のジョイスティック型 3D マウスが抱える操作の難しさや、習熟に時間を要する問題を解消できると考えられる。

具体的には、二つのイメージセンサを 90 度ずらして配置し、トラックボールの回転を三軸で取得する設計とした。イメージセンサの配置の概略図を図 1 に示す。さらに、ボタン入力によって回転入力と並進入力を切り替えられるようにすることで、ユーザが不要な軸操作を同時に行わなくても済むように配慮している。これは先行研究 (GlobeFish) において「回転と並進の同時操作は頻度が低い」と報告されている点を踏まえたものである [3]。

3.2 キーマップ変更用アプリケーション

3D モデリングソフトで使用するショートカットは作業効率を大きく左右するため、ユーザごとの使い方に合わせてカスタマイズできることが望ましい。そこで、ParRot の各キーに自由にショートカットを割り当てられるアプリ

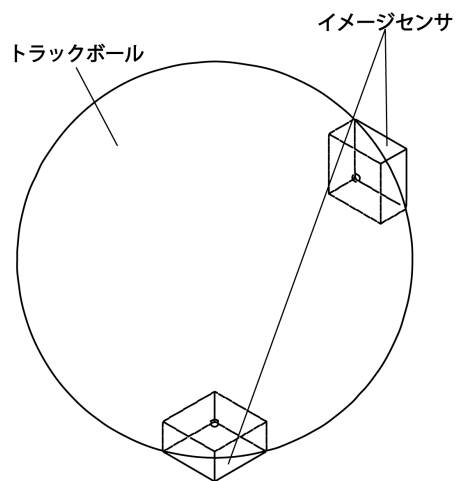


図 1 イメージセンサの配置位置

ケーションを開発する。ユーザがファームウェアを再コンパイルすることなく動的にキー設定を変更できるよう設計する。

4. 実装

4.1 概要

ここでは ParRot の実装の概要について述べる。全体のシステムを図 2 に示す。本システムはデバイス、設定用 Web アプリケーション、Autodesk Fusion のアドインより構成される。

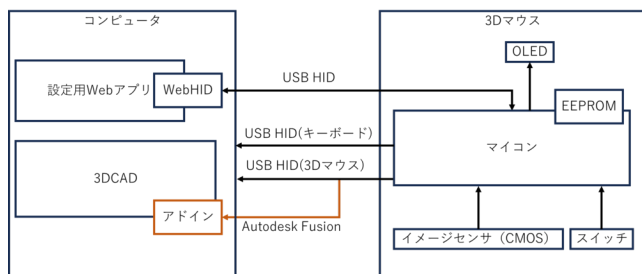


図 2 システムの構成

4.2 トラックボール型 3D マウス ParRot

4.2.1 ハードウェア

本デバイスは、筐体、メイン基板、キーパッド基板、OLED 基板、センサ基板の 4 枚の基板、トラックボールから構成される。筐体は粘土でプロトタイピングを行い、3D プリンタで作成した。図 3 にプロトタイピングの様子を示す。メイン基板には底面のイメージセンサと MCU、PC と接続する USB コネクタ、各基板と接続するコネクタが搭載されている。センサ基板には側面のイメージセンサが搭載されている。キーパッド基板にはショートカット入力用のスイッチが搭載されている。OLED 基板には、情報を表示する OLED とショートカット入力用のスイッチが搭載さ

れている。それぞれの基板の構成を図 4 に示す。トラックボールはケジントン社製の直径 40mm のものを使用した。MCU は raspberry pi 財団の rp2040 を使用した。イメージセンサは PixArt 社の pmw3360 を使用した。完成した ParRot デバイスが図 5 である。

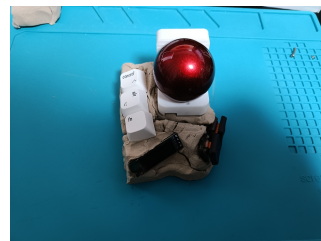


図 3 デバイスのプロトタイピング

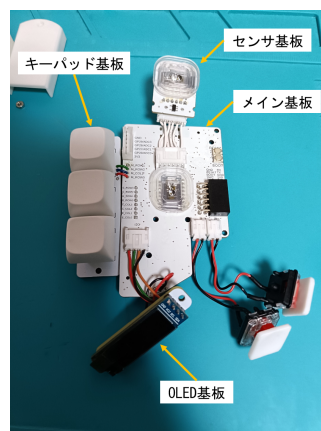


図 4 デバイスを構成する各種基板



図 5 完成した ParRot

4.2.2 ファームウェア

ファームウェアでは、2つのセンサーの値を基に XYZ 軸の回転に変換し、それを送信する仕組みを構築している。通信には汎用性が高く、接続後に追加の操作を必要としない HID (Human Interface Device) プロトコルを採用している。

HID 通信は 3 系統に分割しており、一方は設定用アプリケーションとの通信に使用し、もう一方は 3D マウスとしての動作情報を送信するために利用している。設定用アプリケーションでは、HID を利用して 32bit の文字列を送受信する。また、キーバインド情報は仮想 EEPROM に記憶

している。

3D マウス本体の通信には、HID で定義されている「Multi-Axis Controller」を用いている。Multi-Axis Controller は 6 軸の操作が可能なデバイスであり、X（横移動）、Y（縦移動）、Z（前後移動）、Rx（回転）、Ry（傾き）、Rz（ヨー回転）を制御できる [5]。Blender はこのデバイスの入力に対応している [6] が、Autodesk Fusion は標準で対応していないため、後述のアドインを作成して対応させた。

4.3 キーマップ変更用 Web アプリケーション

ファームウェアをリコンパイルせずにキーマップを変更できるよう、Web アプリケーションを開発した。Web アプリケーションの画面例を図 6 に示す。OS 依存の問題を避けるため、Web ブラウザから HID 通信を行う WebHID 規格を利用している。これにより、Windows, macOS, Linux など多様な環境でキー設定を行える。



図 6 キーマップ変更用 Web アプリケーション

4.4 Autodesk Fusion アドイン

Fusion360 は Autodesk 社が提供する多くのユーザーを持つ 3DCAD である。Fusion360 に対応することで、多くのユーザーが ParRot を使用できるようになる。Fusion360 では HID デバイスの入力を直接処理する仕組みが存在しないため、Python で記述したアドインを介してカメラ操作 API を呼び出す設計を採用した。このアドインは HID から受け取ったデータを変換し、回転角度や移動量として視点に適用する。

5. ユーザテストと評価

5.1 操作性等のアンケート調査

5.1.1 調査概要

本調査では、提案デバイス「ParRot」の操作性およびユーザビリティを定性的に評価するため、アンケート調査を実施した。被験者は 3D モデリング経験の有無を問わず募集し、合計 11 名（20～38 歳）が参加した。被験者のうち、5 名は 3D モデリング経験者であり、6 名は初心者であった。

調査は各被験者に ParRot を 5 分間使用してもらい、その後アンケートに回答する形式で行った。評価はリッカート尺度（1～5）を用い、以下の 6 項目について評価を行った。

- 使いやすさ – デバイスの持ちやすさやボタン配置の適切さ
- 直感性 – 視点移動や回転操作が感覚的に行えるか
- 精度 – 回転操作や視点移動の正確性
- 学習しやすさ – 短時間で基本的な操作が理解できるか
- マウス&キーボードとの比較 – モデリング作業の効率向上に寄与するか
- 従来の 3D マウスとの比較 – 3Dconnexion SpaceMouse と比較した操作性

5.1.2 結果

アンケート結果の平均スコアを表 1 に示す。

アンケート結果から、ParRot は「直感性」と「学習しやすさ」の項目で特に高評価を得た。多くの被験者が「短時間の操作で視点回転をスムーズに行えた」と回答しており、従来のジョイスティック型 3D マウス（SpaceMouse）と比較して視点移動のしやすさが特徴であることが示された。一方、トラックボールのサイズに関しては「指が届きにくい」「もう少し大きい方が操作しやすい」といった意見が見られ、サイズの再設計が必要であることが示唆された。

表 1 アンケート結果 - 平均スコアと標準偏差 (n=11)

項目	平均スコア
使いやすさ	4.45
直感性	4.82
精度	4.36
学習しやすさ	4.73
マウス&キーボードとの比較	4.09
従来の 3D マウスとの比較	4.18
トラックボールのサイズ満足度 (3 を基準)	2.91

5.2 操作時間測定テスト

5.2.1 実験概要

操作時間測定テストでは、3D モデリング作業における視点回転の速度と正確性を比較した。本テストでは、実際のモデリング作業で頻出する「オブジェクトの特定の面と向きを一致させるタスク」を混ぜられたルービックキューブを模した 3D モデルを用いることで再現し、現実的な作業環境に近い条件でテストを行った。対象デバイスは「ParRot」、3Dconnexion 社の「SpaceMouse」、および「マウス&キーボード」である。被験者は 20～21 歳の 4 名で、Fusion360 でオブジェクトの特定の面に視点を回転させるという課題を 3 種類用意し、それぞれの試行を各デバイスごとに 3 回ずつ実施した。本テストは少人数による予備実験として行い、今後さらに被験者を増やして検証を行う予定である。

5.2.2 結果

テスト結果を表 2 に示す。ParRot は全被験者で最短の操作時間を記録し、被験者 A・B の初心者層では特に大きな

性能差が見られた (ParRot: 平均 5 秒前後, SpaceMouse: 平均 40 秒超)。一方, 被験者 C (上級者) では SpaceMouse の操作に短時間で慣れたため, 差は小さかった。総じて ParRot が操作速度の点で優位であると考えられる。

ParRot は全ての被験者において最短の操作時間を記録し, 操作のばらつきも少なかった。特に初心者である A, B において ParRot のパフォーマンスは顕著であった。SpaceMouse は被験者によって結果が大きく異なり, 習熟度が操作速度に直接影響を与える傾向が見られた。マウス & キーボードはタスクによって操作時間にばらつきがあり, 視点回転操作が多い課題 1 や 3 では操作時間が長かった。

SpaceMouse は被験者によって結果が大きく異なり, 視点移動の速度に関して安定性を欠いている傾向が見られた。これは SpaceMouse が多軸同時操作を求められるジョイスティック型デバイスであり, 操作に習熟が必要であることが一因と考えられる。ParRot はトラックボールの回転量がそのまま視点移動に反映されるため, 直感的かつ正確な操作が可能であることが示唆された。

表 2 デバイスごとの課題別操作結果 (秒)

被験者	デバイス	課題 1	課題 2
A	マウス	33.81	5.31
	SpaceMouse	45.43	70.12
	ParRot	5.08	5.60
B	マウス	31.23	3.51
	SpaceMouse	88.83	6.62
	ParRot	4.83	3.89
C	マウス	8.31	15.75
	SpaceMouse	6.34	11.63
	ParRot	5.71	3.01

5.2.3 被験者 C の追加検証 - SpaceMouse の習熟による影響

被験者 C は他の被験者と比較して, 初回の操作時間が短く, 精度も高かった。このことから, C のスキルセットに着目し, SpaceMouse での操作に慣れることでパフォーマンスが向上するかを検証した。SpaceMouse を 10 分間練習したのちに再度同様の計測を行った結果を表 3 に示す。

SpaceMouse は 10 分間の練習後に操作時間が短縮され, ParRot とほぼ同等のパフォーマンスを示した。一方で, ParRot は初回から安定した結果を維持しており, 習熟が必要ないことが確認された。この結果から, ParRot は練習時間を必要とせず, 初心者でも高いパフォーマンスを発揮できる直感的なデバイスであることが示唆される。

5.2.4 被験者 C の追加検証 - ParRot の感度による影響

付随して, 操作感度の調整が視点操作の効率に与える影響を検証するため, ParRot の感度を「2 倍」「3 倍」および「1 倍 (初期設定)」に変更して再度テストを行った。結果を表 4 に示す。

感度 2 倍では最も短い操作時間を記録し, 操作精度が向上した。一方で感度 3 倍では操作速度が向上したものの, ばらつきが見られた。初期設定 (感度 1 倍) では安定した操作が可能であるものの, 操作時間は他の感度設定と比較してやや長い傾向が確認された。

被験者 C は「感度 2 が最も直感的で操作しやすい」とコメントしており, 適切な感度設定が操作パフォーマンスを向上させることが示唆された。

5.3 考察

ParRot は標準状態でも優れた操作性を発揮するが, 感度調整によってさらなる操作時間の短縮が可能であることが明らかになった。特に熟練ユーザは感度調整による恩恵を強く受けることが示されており, ユーザが自ら感度を調整し, 操作に最適な状態を選ぶようなプリセット機能を実装することが重要だと考えられる。

一方, SpaceMouse は感度調整や練習によって操作時間が短縮されるものの, 習熟が必要であり, 初回から直感的に操作できる ParRot とは異なる特性があると考えられる。本研究では ParRot の直感性と学習コストの低さを確認できたが, トラックボールのサイズに対する評価が分かれている点が課題として残った。次期モデルでは複数サイズのトラックボールを試作し, 比較テストを行う予定である。

6. 結論

本研究では, 3D モデリング作業の効率化と直感的な操作を実現するために, トラックボール型 3D マウス「ParRot」を設計・実装し, その有用性について検証した。従来のジョイスティック型 3D マウスが持つ高価格・習熟の難しさといった課題に対し, ParRot は低価格で導入可能であり, 短期間での習熟できる可能性が示された。

テストの結果, ParRot は初心者に対して特に高い操作性と直感性を提供し, SpaceMouse と比較しても視点移動の速度と精度で優位性を持つ可能性が示唆された。また, キーマッピングを柔軟に変更可能な Web アプリケーションや, Fusion360 向けのアドインなど, 周辺ソフトウェアを含むエコシステムの構築によって, ユーザのニーズに応じた柔軟な対応を可能にした。

7. 今後の展望

今回の調査では, 有用性を強く主張するにはやや少ない人数しか調査できなかった。今後より多くの被験者でより実態に即したテストを行い, 統計的に有意なデータを取得することを予定している。年齢層やモデリング経験を幅広く考慮し, 多様なユーザ層の意見を反映することで, ParRot をより便利で使いやすいデバイスにしていく。最終的には, 低価格かつ直感的な操作が可能な 3D マウスとして, エントリーユーザからプロフェッショナルユーザま

表 3 SpaceMouse の習熟による操作結果 (被験者 C) (秒)

被験者	デバイス	課題 1	課題 2	課題 3	課題 1	課題 2	課題 3	課題 1	課題 2	課題 3
C さん	マウス	8.31	15.75	7.36	12.56	6.76	4.97	7.89	8.12	5.76
	SpaceMouse	6.34	11.63	8.55	4.31	3.68	3.18	5.21	4.77	4.12
	ParRot	5.71	3.01	4.70	2.88	3.14	3.78	3.65	4.12	3.29

表 4 ParRot 感度変更による操作結果 (被験者 C) (秒)

被験者	デバイス	感度 1 倍			感度 2 倍			感度 3 倍		
		課題 1	課題 2	課題 3	課題 1	課題 2	課題 3	課題 1	課題 2	課題 3
C さん	ParRot	2.61	2.54	3.43	1.7	2.04	2.23	2.65	1.31	2.11

で幅広く利用されるデバイスを目指すとともに、3D モデリング市場に新たな選択肢を提供する存在になることを目指す。

参考文献

- [1] 3Dconnexion:SpaceMouse, <https://3dconnexion.com/jp/spacemouse/> (参照日: 2024 年 12 月 22 日).
- [2] Kulik, A., Hochstrate, J., Kunert, A., Froehlich, B.: The Globefish: A novel input device for desktop-based 3D interaction. In: IEEE Symposium on 3D User Interfaces, pp. 159, Lafayette, Louisiana, USA (2009).
- [3] Kulik, A., Hochstrate, J., Kunert, A., Froehlich, B.: The Globefish: A 3D Motion Controller. In: Proceedings of IEEE Virtual Reality, pp. 299–300, Lafayette, Louisiana, USA (2009).
- [4] 特許情報プラットフォーム (J-PlatPat) : 特許公報 JP-2011-515764, <https://www.j-platpat.inpit.go.jp/c1801/PU/JP-2011-515764/11/ja> (参照日: 2024 年 12 月 22 日).
- [5] USB Implementers Forum: USB Documents, <https://usb.org/documents> (参照日: 2024 年 12 月 22 日).
- [6] Blender Foundation: Hardware Requirements - Blender 2.81 Manual, https://docs.blender.org/manual/ja/2.81/getting_started/configuration/hardware.html (参照日: 2024 年 12 月 22 日).