

6 自由度インタフェースデバイスのための クリック及びクラッチ機構に関する検討

一色正晴 馬場次郎 赤羽克仁
橋本直己 佐藤誠
東京工業大学 精密工学研究所

本稿では、クリック及びクラッチ機構を持つ新しい6自由度インタフェースデバイスのためのグリップのデザインと実装について検討する。提案グリップは、従来の入力方法と比較して、より操作性が高く回転操作に適したインタフェースである。操作性の関する評価として、ドッキングタスクを行い、タスク完了までの時間を比較した。その結果、従来の入力方法よりタスク完了までの時間が短縮されることを確認した。

A Study on Click and Clutch Mechanism for 6DOF Interface Devices

Masaharu ISSHIKI Jiro BABA Katsuhito AKAHANE
Naoki HASHIMOTO Makoto SATO
Tokyo Institute of Technology

This paper describes design and implementation of new Grip with Click and Clutch mechanism. This grip is excellent in particular in rotating operation and has the high operability compared with current methods. Operability evaluation experiments showed that proposition method completes tasks in time shorter than current methods.

1. はじめに

パソコンの演算、画像処理性能の飛躍的向上により、職場や家庭において、3D-CADによる設計やゲームなどの形で、3次元空間の利用が急速に普及している。さらに、こうした3次元空間内の操作性を向上させるためのヒューマンインタフェースデバイスとして、6自由度操作が可能なインタフェースデバイスの開発が進んでいる。

6自由度インタフェースデバイスは、いわばマウスを3次元に拡張したデバイスであり、並進3自由度、回転3自由度の計6自由度の入力が可能なデバイスである。このデバイスでアプリケーションを操作する際、次に述べるクリック及びクラッチ操作の仕組みが必要である。

クリック操作は、マウスにおけるクリックと同様であり、オブジェクトの選択・決定などに用いられる。クラッチ操作とは、マウスにおける本体を上を持ち上げ、現実世界のマウスと仮想世界のポインタの動きの連動を切る操作のことである。本稿では、連動している状態をクラッチがオン、連動が切れている状態をクラッチがオフであると表現する。

マウスではパッドの広さが限られているため、操作中にパッドの端に到達した場合、マウスを持ち上げてパッドの中央付近に戻す操作をする。これと同様に、6自由度インタフェースデバイスにおいてもグリップの可動範囲が限られているため、クラッチをオフにしてグリップとポインタの連動を切り、

その間にグリップを可動範囲の中央付近に戻す必要がある。

問題点として、マウスは入力が2次元であるため、上を持ち上げればポインタとの連動が切れるのに対し、6自由度インタフェースデバイスでは、垂直方向の動きも認識するため、ポインタとの連動を切る操作には使えないことが挙げられる。故に、マウスとは異なる仕組みによりクラッチの状態を切り替える必要がある。

そこで本研究では、クリック及びクラッチ機構を持つ6自由度インタフェースデバイスのためのグリップを提案する。また、提案グリップの操作性に関する評価実験を行い、有用性を検討する。

2. 従来研究

これまでに開発された6自由度インタフェースデバイスとしては、入力のみが可能な3Dconnexion社のSpaceNavigator [1]や、出力としてユーザに力覚を提示することが可能なハプティックデバイスが開発されている。ハプティックデバイスとしては、本研究室によるSPIDAR-G[2][3] (図2.1)、Force Dimension社によるDelta.6[4] (図2.2)、Novint Technologies社によるNovint Falcon [5] (図2.3) などがある。

これらのデバイスは、位置姿勢の取得及び力覚提示を主眼として開発されており、SPIDAR-Gのグリップではスイッチ機構の検討が始まったばかりであり、Delta.6のグリップにはスイッチ類が無く、2006年に発売された新しいデバイスである

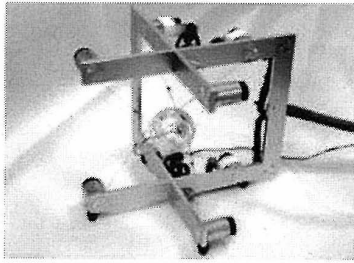


図2.1 SPIDAR-G

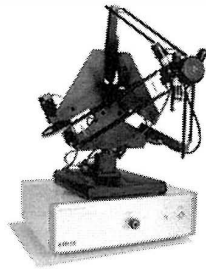


図2.2 Delta.6

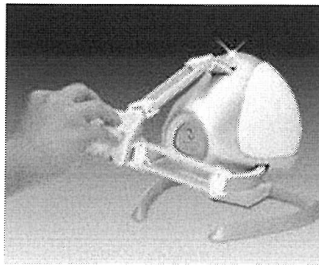


図2.3 Novint Falcon

Novint Falconにはスイッチがあるものの、クラッチ機構について特別の配慮は見られない。そのため、実際の利用においては、グリップの可動範囲と仮想世界とのスケールを1:1に調整することや、グリップ上のスイッチまたはキーボードなどを用いてクラッチ操作を行うこと等が必要であり、十分な操作性を有しているとはいえない。

クラッチ操作に関しては、6自由度インタフェースデバイスの操作性に関する論文[6][7]でその必要性が述べられているが、具体的な構造の検討や実装、及び評価実験は確認できなかった。

3. クリック及びクラッチ機構の提案

3.1 クラッチ操作の実現方法

クラッチ操作を実現するためには、グリップとポインタの連動のオンオフを切り替える方法が必要である。その方法と

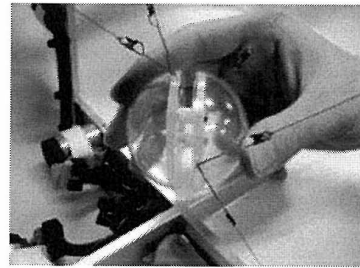


図3.1 外部スイッチ（キーボードと併用）

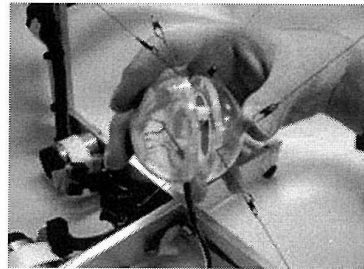


図3.2 並列スイッチ

しては、スイッチを押すたびにクラッチ状態のオンオフを切り替える方法と、スイッチを押している状態と離している状態でクラッチ状態のオンオフを切り替える方法が考えられる。その操作は身体の中の部位で行っても実現可能であるが、一般的なインタフェースで広く普及している手による操作を前提とする。

本研究で対象とした6自由度インタフェースデバイスは、力覚提示装置SPIDAR-Gであるが、提案手法は把持グリップを持つデバイスであれば適用可能である。

3.2 従来型の手法

6自由度インタフェースデバイスにクリック及びクラッチを実装する方法としては、クリック及びクラッチに、キーボードのような既存のインタフェースを利用する方法が最も簡単である。そこで、グリップにはスイッチをもたず、キーボードと併用して利用する外部スイッチ方式のグリップを図3.1に示す。この方法では、キーボードのXキーをクリックに、Zキーをクラッチのオンオフ状態の切り替えに割り当てた。

しかし、右手でグリップを持ち、左手でキーボードを操作するという両手操作は、マウスが片手のみで操作できることと比較して複雑である。また、2台のインタフェースデバイスを利用した両手作業ができない。これらの特徴と問題点を表3.1に示す。

片手で操作可能なクリック及びクラッチ機構としては、図3.2に示すような並列スイッチ方式が考えられる。この方式は、2ボタンマウスと同様に2つのスイッチグリップに配置するこ

表3.1 外部スイッチの特徴と問題点

外部スイッチ	
特徴	・キーボード併用による両手操作 ・クラッチは切り替え式
問題点	・両手を使用するため操作が複雑 ・2台の入力デバイスを併用不可能 ・クラッチ操作が容易ではない

表3.2 並列スイッチの特徴と問題点

並列スイッチ	
特徴	・マウスに似た実装 ・スイッチが狭い範囲に局在 ・クラッチはスイッチ押下時にオン
問題点	・グリップの回転操作時、スイッチの位置に指を合わせる必要がある ・グリップ把持がスイッチ操作に干渉する

とにより、クリック及びクラッチ操作を片手で行うことを可能とした。

しかし、並列スイッチ方式は、3次元での回転操作に問題があると考えられる。第一に、グリップ上の決まった位置にスイッチが局在するため、グリップを回転させたとき、指の位置をスイッチの位置に合わせる必要がある。したがって、指の位置は、グリップを最も操作しやすい位置から離れることになる。第二に、6自由度インタフェースデバイスでは、自由度が高いためグリップを把持する必要がある、グリップを支えつつクリック操作が必要となり、操作性の低下が考えられる。これらの特徴と問題点を表3.2に示す。

3.3 提案手法

本研究では、スイッチがグリップの特定部位に局在せず、グリップの把持とクリック及びクラッチ操作が競合しない新しいタイプのグリップとして、図3.3に示す把持グリップを提案するとともに、設計、実装及び操作性評価実験を行った。

把持グリップは、クリック及びクラッチの操作を、カメラのシャッタースイッチのような2段階式のスイッチによって行う。すなわち、最小の力でグリップを把持しているときは、クラッチがオフとなりグリップとポインタは連動しない。弱い力で握ると、クラッチがオンになりグリップとポインタは連動するが、クリックは押されない。力をいれて最後まで握ることにより、クリックスイッチが押される機構である。この操作の様子を図3.4に示す。

この方式では、クリック及びクラッチが、いわば球面全体に分散的存在することになり、グリップを回転させても操作性が低下しないことが期待できる。さらに、球面上にスイッチが無いため、クリック及びクラッチ操作とは無関係に、

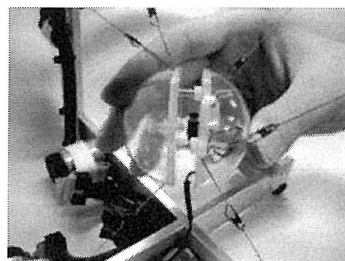


図3.3 把持グリップ

表3.3 把持グリップの特徴と利点

把持グリップ	
特徴	・スイッチが半球面全体に分布的存在 ・クラッチとクリックは2段階の動作 ・クラッチはグリップ把持時にオン
利点	・回転操作がスイッチ操作に影響しない ・グリップ把持がスイッチ操作に干渉しない

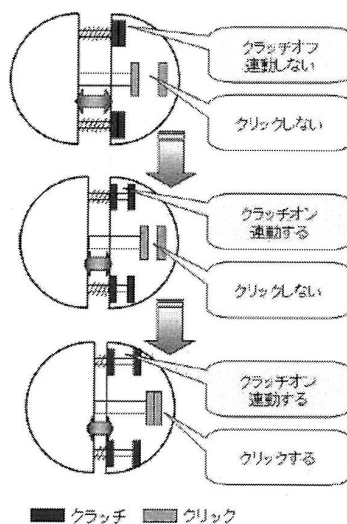


図3.4 把持グリップの動作

常に操作しやすい指の位置でグリップを支持することができ、操作性が高いと考えられる。また、力を入れている時にグリップとポインタが連動することは、操作の直感性が高いと考えられる。把持グリップの特徴と利点を表3.3に示す。

また、本質的には、スイッチが局在せず分布的であること、つまりグリップ全体のどこでもスイッチとして扱えることが重要であり、これら条件を満たすグリップの形状は提案手法

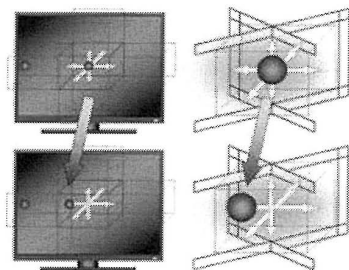


図3.5 (a) クラッチオンでグリップを動かす

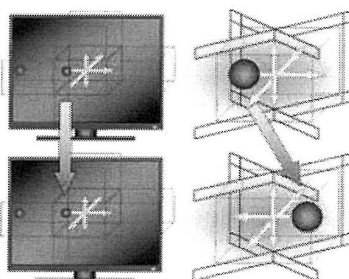


図3.5(b) クラッチオフでグリップを戻す

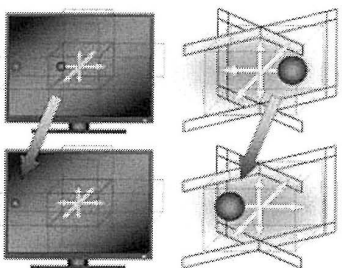


図3.5(c) クラッチオンでグリップを動かす

以外にも考えられる。たとえば、グリップを握るとテニスボールのように球殻が縮み、縮んだ量によって2段階にクリック及びクラッチ操作が行える仕組みなども考えられる。

なお、把持グリップではクラッチオフの状態ではクリックができない。言い換えれば、グリップとポインタの連動を切った状態でクリックができないことになるが、クラッチオフの状態をクリックのみを行う場面は少ないため、問題は生じないと考えられる。

3.4 クラッチの使用法

クラッチを用いた仮想ポインタの操作方法を図3.5に示す。図3.5において、ディスプレイ中央の青いポインタを、左端の点の位置まで移動する場合について述べる。グリップの可動範囲を矢印で表すとき、この範囲でグリップを動かしたとき

のポインタの動きが、ディスプレイ上の矢印と対応している。クラッチなしで操作できる範囲を直方体のフレームで示した。

まず、図3.5(a)で示すように、グリップはデバイス可動範囲の中央にあるとして、クラッチオン状態でグリップを左に動かす。その結果、ポインタも連動して左に移動する。次に、図3.5(b)で示すように、クラッチをオフ状態にしてグリップをデバイス可動範囲の右端に戻す。このとき、ポインタは連動せずに停止している。最後に、図3.5(c)に示すように、再びクラッチをオンにしてグリップを左に動かす。その結果、ポインタも連動して左に動き、目標地点に到達する。

以上のように、広大な3次元空間内で、デバイスの可動範囲外にある物体を操作する場合には、クラッチ機構は必要不可欠である。

4. 操作性評価実験

4.1 実験環境

3種類のグリップについて、クリック及びクラッチの操作性を評価するため、ドッキングタスクと称する実験を行った。実験には市販のパソコン及びディスプレイを用い、6自由度インタフェースデバイスとしてSPIDAR-Gを用いた。実験環境を図4.1に示す。被験者は実験タスクのセットされたパソコンの前に座り、マウスの代わりにSPIDAR-Gを操作して実験タスクを行う。

本実験で用いた機材とスペックは以下の通りである。

- ・ハプティックデバイス：SPIDAR-G 6DOF
- ・パソコン：Pentium4HT 3.4 GHz 1GB RAM
- ・ディスプレイ：17inch SXGA(1280*1024)

4.2 実験の手順と評価方法

実験は、図4.2に示す実験アプリケーションによって行う。被験者はSPIDAR-Gを用いて、3次元空間内のポインタを操作する。ポインタは正四面体で表現し、4頂点には青、緑、黄、紫の球が示されている。実験を開始すると、ポインタより少し色が暗いターゲット正四面体が示されるので、必要に応じてクラッチを使いながらポインタを動かしてターゲットに重ね合わせる。

正四面体の頂点にある対応する色の球が全て部分的にでも重なりをもっている状態をドッキング可能状態と呼ぶ。ドッキング可能状態ではターゲット正四面体の辺が赤くなり、この状態でクリックを押すと、ドッキングが成立して1セッションが終わる。その直後に別の場所に新しいターゲットが表示されて次のセッションに入る。(図4.3) このセッションを11回行うことで実験タスクの1試行が完了する。

実験データの処理については、実験タスクを5回試行し、セッション毎に所要時間のトリム平均を求め、それらの和を実験タスクの所要時間とする。実験タスクは、ターゲットの移動の仕方によって表4.1に示す3種類を行った。

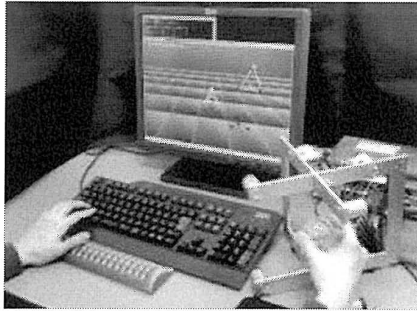


図4.1 実験環境

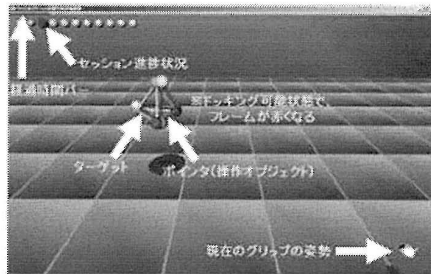


図4.2 実験アプリケーションの画面

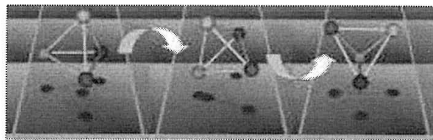


図4.3 セッション毎のターゲットの移動

なお、トリム平均を採用した理由は、被験者の操作の失敗によって、グリップの操作性とは関係なく著しく所要時間がかった場合や、偶然的に早くセッションが終わるケースが見られたため、それらによる外乱を排除するためである。但し、それらのミスは多くはなく、実験回数が十分だったと見られ、単純平均値や中位値との差はほとんど見られなかった。

4.3 並進タスク評価実験

並進タスクの所要時間のグラフを図4.5に示す。並進タスクでは、どの被験者についても把持グリップと並列スイッチがほぼ同等の所要時間となった。また、どの被験者についても外部スイッチのみ所要時間が長かったが、どれほど長くなるかについては、若干の個人差が見られた。

なお、所要時間にも個人差が見られるが、これは個人に適した操作速度の違いに起因していると考えられ、3種類のグリップ間での操作性の比較に影響を与えるものではないと考えられる。

表4.1 3種類の実験タスク

	並進移動	回転姿勢変化
並進タスク	する	しない
回転タスク	しない	する
複合タスク	する	する

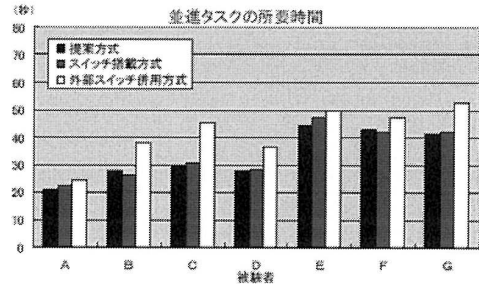


図4.5 並進タスクの所要時間

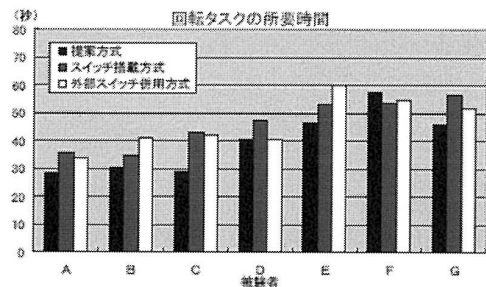


図4.6 回転タスクの所要時間

4.4 回転タスク評価実験

回転タスクの所要時間のグラフを図4.6に示す。回転タスクでは、被験者Fが例外的であるが、全般的に並列スイッチと外部スイッチの所要時間が長い傾向が強く、被験者Cではその傾向が顕著に見られた。

4.5 複合タスク評価実験

複合タスクの所要時間のグラフを図4.7に示す。複合タスクでは、回転タスクと同様に、並列スイッチと外部スイッチの所要時間が長かった。やはり被験者Cでその傾向が顕著であり、人によっては並列スイッチも外部スイッチも非常に操作性が低いデバイスであることが伺える。

4.6 主観評価アンケート

実験終了後、被験者の主観によるアンケートを実施した。まず、並進タスク、回転タスク、複合タスクのそれぞれについて、一番使いやすかったグリップ（複数回答可）を選択させた結果を表4.2にまとめる。

これによれば、並列タスクでは把持グリップと並列スイッチが同程度であるが、回転を伴うタスクでは把持グリップの使いやすさが非常に高いことが分かる。

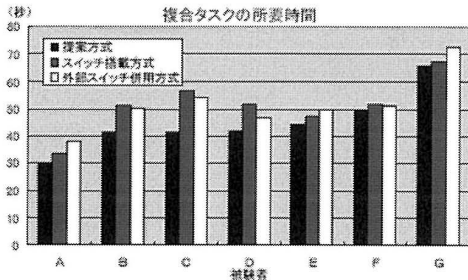


図4.7 複合タスクの所要時間

また、外部スイッチ方式は全てのタスクにおいて、使いやすいグリップとみなされないことが分かる。

次に、3種類のグリップに関して質問を行った。

質問1 外部スイッチは、操作に戸惑いを感じますか？

質問2 並列スイッチは、回転操作の時にスイッチが押しにくいと思いますか？

質問3 把持グリップは、直感的な操作ができると思いますか？

これらの質問に対しては、質問2と3では、「とても思う」という解答がほとんどだった。しかし、質問1では、戸惑いを感じる人が多いが、あまりそうは感じない人もいた。しかしながら、表5.2に示すように、外部スイッチを使った方法は全てのタスクにおいて所要時間が長く、戸惑いを感じずとも、操作性が高いとは言えないという結果になった。

4.7 結果の考察

3種類のグリップによる所要時間について、把持グリップを100とする指数に直し、全被験者の平均値を求めたものを図4.8に示す。図4.8より、3種類のグリップの操作性に関して表4.3の特性を導くことができる。

これにより、把持グリップの操作時間と比べ、並列スイッチでは15～20%、外部スイッチでは16～26%、操作に時間がかかることが分かる。この結果は、表5.1における主観アンケートとも全く同じ傾向であり、定量的にも主観的にも、提案手法である把持グリップが従来手法と比較して優位であると結論することができる。

把持グリップと並列スイッチを比較すると、並進タスクでは同等であるが、回転タスクでは並列スイッチが劣っている。また、並進と回転の混ざった複合タスクでも同様である。この結果から、並列スイッチが回転操作に弱いことが分かる。この原因は、表3.2における並列スイッチの問題点によるものと考えることができ、同時に、表3.3における把持グリップの利点によるものと考えることができる。

把持グリップと外部スイッチを比較すると、外部スイッチが全てのタスクで劣っている。この原因は、両手操作という

表4.2 一番使いやすかったグリップ

	並進 タスク	回転 タスク	複合 タスク
把持グリップ	4人	6人	6人
並列スイッチ	3人	1人	2人
外部スイッチ	1人	0人	0人

所要時間の平均値(把持グリップを100とする指数)

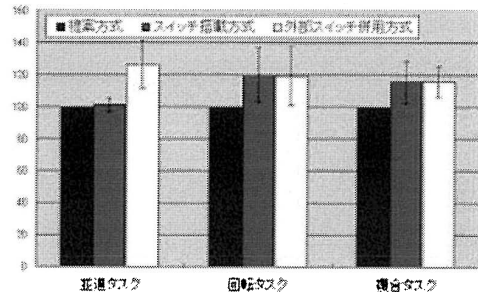


図4.8 所要時間の平均値

表4.3 3種類のグリップの操作性 (操作時間)

	並進 タスク	回転 タスク	集合 タスク
把持グリップ	○(100)	○(100)	○(100)
並列スイッチ	○(101)	×(120)	×(115)
外部スイッチ	×(126)	×(119)	×(116)

複雑さに加え、クラッチが切り替え式であるという2つの点で、操作性が低下した結果と考えられる。

5. おわりに

本稿では、6自由度インタフェースデバイスのためのクリック及びクラッチ機構の検討を行い、新しいグリップのデザインと実装を行った。提案グリップの操作性を評価するために、従来手法とドッキングタスクにおけるタスク完了までの時間やアンケートによる主観評価を行った。その結果、提案グリップが従来手法よりタスク完了時間が約15%短縮され、操作性が向上していることを確認した。

提案手法である把持グリップは、様々な改良の余地を残している。グリップ本体の軽量化、耐久性の向上、使い勝手の向上、配線の簡素化、見た目のデザインの洗練、個人の好みへのカスタマイズなども含めて、ヒューマンインタフェースとしての完成度を高めることが課題である。また、本実験では、SPIDAR-Gを6自由度の入力デバイスとして利用し、力覚は用いなかった。今後、物理シミュレータによる力覚環境下で、ハプティックデバイスのグリップとしての操作性を評価することも課題である。

参考文献

- [1] 3Dconnexion, <http://www.3dconnexion.jp/>
- [2] 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, 電子情報通信学会論文誌, Vol. J74-D-2, No. 7, pp.887-894 (1991).
- [3] 井上雅晴, 長谷川晶一, 金 時孝, 佐藤 誠: 二次計画法を用いたワイヤ駆動型力覚ディスプレイのための張力計算アルゴリズム, 日本バーチャルリアリティ学会第6 回大会論文, pp.91-94(2002).
- [4] Force Dimension : Delta.6.
<http://www.forcedimension.com/delta6-overview>
- [5] Novint Technologies : Novint Falcon.
http://home.novint.com/products/novint_falcon.php
- [6] Shumin Zhai : User Performance in Relation to 3D Input Device Design, Computer Graphics 32(4), pp.50-54 (1998)
- [7] Ken Hinckley, Randy Pausch, John C. Goble, and Neal F. Kassell : A Survey of Design Issues in Spatial Input, UIST' 94, pp.213-222 (1994)