

階層情報の3次元視覚化に関する評価

土本 光一[†] 竹村 治雄[†] 片山 喜章[†]
萩原 兼一^{††} 横矢 直和[†]

†奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科
††大阪大学基礎工学部

現在、実時間3Dコンピュータグラフィックスを計算機のユーザインタフェースに利用する試みがなされている。これにより人の空間知覚能力を活かした直感的なインタフェースが構築可能である。本報告では、このようなインタフェースの特性の評価・考察を行うために、階層情報の3D視覚化手法に関する二つの評価実験を行う。一つは最適な3Dインタラクティブアニメーションに関する実験、もう一つは3D空間の有効利用のパフォーマンスに関する実験である。具体的には階層情報の3次元視覚化プログラム(Cam Trees)を用いて、回転のアニメーション方式とその最適速度を検証し、表示されるノード数によるパフォーマンスを測定する評価実験を行う。

その結果、回転に最適なアニメーション方式に関しては、線速度一定方式が最適であることを示し、その最適値を導いた。また表示されるノード数による被験者のパフォーマンスの変移がクリック数におおむね比例し、クリック数は階層数と子ノード数によって大まかに決まることが明らかとなった。

An Evaluation of Hierarchical Information Visualization using 3-D Graphics

Kouichi TSUCHIMOTO[†] Haruo TAKEMURA[†] Yoshiaki KATAYAMA[†]
Kenichi HAGIHARA^{††} Naokazu YOKOYA[†]

†Graduate School of Information Science, Nara Institute of Science and Technology
††Faculty of Engineering Science, Osaka University.

In this paper, we report an evaluation of hierarchical information visualization using 3-D graphics and interactive animation. Real-time 3-D interactive graphics make it possible to construct 3-D user interface which effectively utilize human spatial perception. These Interfaces can increase effective use of available screen space and decrease user's cognitive load. To confirm these advantages, two experiments with node-searching tasks on 3-D directory trees are performed. One is to determine the optimal rolling animation method and rate. The other is about evaluating user performance with regard to complexities of tree structure. The results clearly shows some promising properties of 3-D user interface.

1 はじめに

近年、計算機ハードウェア技術の向上等により、高速な3次元(3D)コンピュータグラフィックスの表示が可能な計算機が普及しつつあり、実時間3Dグラフィックスを計算機のユーザインタフェース(UI)に利用する試みがなされている。このようなUIは3Dユーザインタフェース(3DUI)と呼ばれ、バーチャルリアリティや現在の2次元(2D)のグラフィカルユーザインタフェース(GUI)環境を拡張するUIとして注目されつつある。

例えば、3DUIのプロトタイプ的な実装例の一つである、Information Visualizer [1]は通常のグラフィックスWSで実現可能な、3Dグラフィックスやインタラクティブアニメーションを利用し、情報を扱う作業空間の拡張や、ユーザとシステム間のインタラクションの改善、情報の持つ抽象的構造の視覚化等の実現を試みている。Information Visualizerに採用される情報の3D視覚化手法にはPerspective Wall [2], Cone Trees [3,4] (図1)等がある。

この例のように、現在3DUIの実装が行われ始めているが、立体視装置や3Dポインティングデバイスを用いるものからCRT画面上に3Dグラフィックスを表示するだけのものまで実装形態は様々であり、いずれもプロトタイプの域を脱しておらず、効果的な3DUIの基本的特性は未だ不明瞭である。

筆者らは、3DUIの基本的特性の一部であると思われる、3D空間の有効利用、インタラクティブアニメーションの使用の有効性について明らかにすることを試みた[5]。具体的には、Information Visualizerで使用される階層情報の3D視覚化手法の一つであるCone Treesに着目し、2Dツリーとの比較による評価実験を行った。

その結果、Cone Treesの利点[3]のうち以下のものを確認した。

- 3D視覚化による提示情報の増加
- 情報のfisheye viewの自然な実現

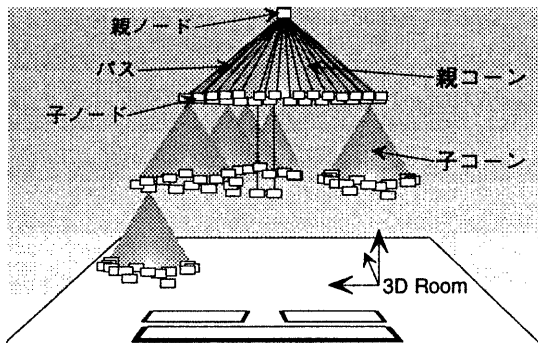


図 1: Cone Trees

- アニメーションによる2Dツリーのスクロールの負担の改善。

また、次の問題点を指摘した。

- 情報の全体構造の視覚化に限界がある。
- ノードの3D空間への配置の不都合によるノード選択や認識困難の発生。
- 不適切なアニメーションによる認知的負荷の増大。

本報告では、3DUIの基本的特性をより明確にし、3DUIの有効性をさらに向上するために、これらの問題点を検証するために行った評価実験について述べる。実際に行った評価実験は次の二つである。

1. Cone Treesの回転のアニメーション方式とその最適速度の検証
2. Cone Treesのノード数(階層数・子ノード数)によるパフォーマンスの変化の把握

以下、2節では階層の3D視覚化手法であるCone Treesの特徴について述べ、3節では評価実験について述べる。

2 階層の3D表示 - Cone Trees

2.1 概要

Cone Treesは3Dグラフィックスとインタラクティブアニメーションを利用した、階層情報の視覚化を目的とする情報表示手法であり、木構造の3D表現の一種である(図1)。以下にその特徴をあげる[3]。

- Cone Treesは、コーンの階層的集合体である。コーンは親ノードを頂点に円錐の底の円周に均等に子ノードを配置する。親子ノードはパスで結ばれる。親コーンのノードが子コーンの頂点となる。
- Cone Treesの頂点は3D roomと呼ばれる画面に描画される空間の天井に固定される。各コーン

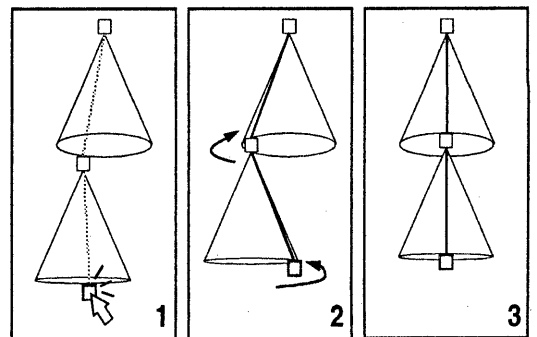


図 2: ノード選択時のCone Treesのアニメーション

ンの高さは均一で、3D roomにCone Trees全体が収まるように定まる。コーンの半径は1番下の階層全体がroomに適合するように定まる。

- Cone Treesは通常のマウスで操作され、ノードを選択すると、Cone Trees全体がアニメーションで回転し、頂点ノードから選択されたノードまでパスでつながった全てのノードは画面正面に移動する。各コーンは回転距離が最も短くなるように独立に回転する。(図2)
- Cone Treesは複雑な階層の操作を補助するために、コーンを消去したり、再び表示するガーデニング(gardening)操作が可能である。
- ノードをつかんで他のコーンへ移動し放すことでノードの移動が可能である。
- メニューを利用し、ノード名を指定することにより目的のノードを探索することができる。

Cone Treesではノードが小さく、ノード内に横方向に文字を表示しにくい。そのためCone Treesを横向きに倒して、ノード内に文字を容易に表示できるようにした、Cam Treesと呼ばれるバージョンが用意される(図3)。Cam Treesでは頂点ノードが画面左中央に、ツリーの底が画面右に来る。本報告ではCam Treesを評価実験に使用する。

2.2 利点と問題点

Robertsonらは、3Dグラフィックスとインタラクティブアニメーションの利用により、Cone Treesがより大規模な情報の取り扱いを実現すると主張している[3]。Cone Treesにおける3Dグラフィックスの利用の利点として以下を挙げている。

1. ディスプレイ画面の効果的利用による全体構造の視覚化
木構造を2Dで表現する場合、木構造全体の縦横比が問題になる。ノード数が多い場合、画面には部分しか表示できず、全体構造を把握するためにスクロールや全体の縮小像が必要となる。これに比べ、Cone Treesは3Dの奥行きを利用してノードをコーン状に配置するの

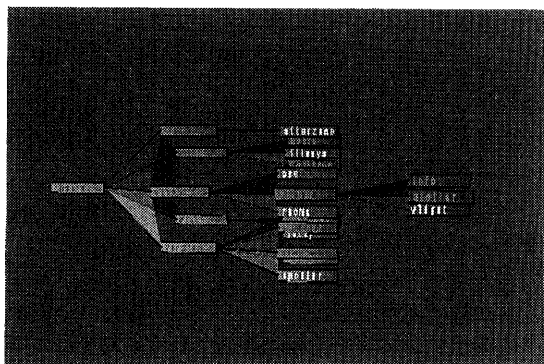


図 3: Cam Trees (実験用プログラム)

で、全体像を保ちながら、より多くの情報を提示できる。

2. fisheye view効果の提供
Cone Treesでは選択したノードは常に正面に来るため、他のノードに比べ近くて大きい。これはユーザの注目する度合いに応じて、fisheye view効果を自然に実現する。
3. 奥行き感覚による知覚の手がかりの増加
3Dグラフィックスがもたらす遠近法的な視野や光の加減、影などはユーザの情報知覚を促進する。

また、アニメーションの利用の利点として以下を挙げている。

1. 認知的負荷の軽減
画面のスクロールや画面の切り替わりの際にユーザは注目している物体を見失うことがある。そのような喪失物を探して再認識することはユーザに負荷をかける。このような負荷を認知的負荷という。アニメーションは画面の切り替わりの間を補完するので、ユーザはアニメーションを目で追うことにより物体を見失うことが少なくなり認知的負荷が減少する。
2. アニメーションの観察による情報構造の理解
ツリーの回転により、全体構造を様々な角度から観察できる。
3. 運動視差による奥行き知覚の促進
アニメーションにより生まれる運動視差はユーザの3D空間の知覚を促進する。
4. タスクを楽しくする効果

これらの利点について、Robertsonらは主にCone Treesを2Dツリーと比較することにより論じているが、そこでは具体的に検証されていない[3]。筆者らは既にCam Treesと2Dツリーの比較実験を行い、以上の点の具体的な検証を試みた[5]。結果を以下に挙げる。

3Dグラフィックスによる情報提示に関しては次の通りであった。

- Cam Treesは2Dツリーに比べ提示可能な情報(ノード数等)を増大し、それらをfisheye viewで提示した。
- ノードが微妙に重なっている場合にノード選択が困難であることや、コーンが多数重なっている場合、ノードの並び方の情報等の認識が困難である等の問題点が明らかになった。
- 全体と個々の情報を同時に自然に提示することは限界があった。この限界は情報構造のバランスやプログラムの表示手法に左右されると考えられる。一概に厳密な限界を述べることは困難であるが、3Dの場合2Dツリーに比べれば多く、

1500ノード以下であると考えられる。

アニメーションに関しては次の通りであった。

- アニメーションの使用は確実に2Dツリーのスクロールの負担を改善した。
- 被験者からアニメーションに関して「動きを見失った」「予想していた動き異なって困惑した」等の感想が得られた。これは実験用プログラムでは、選択したノードを常に画面中央に持ってくるために、頂点の位置をそのつど変えるという方式を採用したことと、どのノードを選択してもアニメーション時間が一定になるようにした（しかもユーザには少し速すぎた）ことが原因であると考えられる。従って、アニメーションにより、ユーザの認知的負荷を更に軽減するためには、既に作成した実験用プログラム[5]を改良する余地があった。

3 評価実験

3.1 目的

前節で述べた結果を元に、本報告は、3DUIの基本的特性をより明確にし、3DUIの有効性の向上のための指針を得る目的で評価実験を実施した。これらは、

評価実験1：Cam Treesの回転のアニメーション方式とその最適速度の検証

評価実験2：Cam Treesのノード数による被験者のパフォーマンスの変化の把握

の二つである。

まず初めに、評価実験1としてCam Treesの回転のアニメーション方式に関する実験を行う。[5]の結果から、[5]で採用されたアニメーション方式と速度は、被験者にとって必ずしも適切ではないことがわかった。従って、アニメーションによって被験者の認知的負荷を軽減するためには、被験者の知覚に最適なアニメーション方法と速度を明らかにする必要がある。またRobertsonらも回転方式の検討の必要性を指摘している[3]。

評価実験1で考える回転方式は時間一定・角速度一定・線速度一定の3方式である。

時間一定方式：回転のアニメーションが開始してから終了するまでの時間が一定である。そのためどの階層のノードを選択してもノードが正面に来るまでの時間は同じである。

角速度一定方式：全てのコーンの一定時間当たりの回転角（角速度）が一定である。角速度はツリー全体でもっとも回転する必要があるコーンを基準に決定し、その値を他のコーンに適用する。

線速度一定方式：コーンが回転する際に、一定時

間当たりのコーンの円周上の移動距離が一定である。そのためコーンの半径が大きいほど、また奥のノードを選択するほどノードが正面に来るまでに時間がかかる。

評価実験1では回転方式に関する二つの実験を行う。まず上記の三つの回転方式別に最適速度を被験者のタスクパフォーマンスと主観評価から検討する。これを実験1Aとする。実験1Aで導かれた最適速度を適用した各回転方式で、どの方法が被験者にとって一番良いかを比較する。これを実験1Bとする。

次に、評価実験2として、実験1で導かれた回転方式を採用したCam Treesを使って、ノード数による被験者のパフォーマンスの変化を測定する実験を行う。筆者らは既に、Cam Treesについてはノード数150と1500の場合について考察した[5]が、ノード数150と1500の間の差が大きく、ノード数と操作性に関する詳細なデータは得られていない。3DUIの効果的な空間利用について検討するにはより詳細なデータが必要と考え、ノード数約50から約1500までの間をノード数（階層数・子ノードの数）に着目したより詳細な実験を行う。

実験はSGI社製のグラフィックWS Onyx RE2に、標準装備のマウス、21インチディスプレイを使用した。

3.2 実験用Cam Treesプログラムの動作

筆者らはオリジナルのCone Treesを入手できなかったため、[3,4]を参考に実験用プログラムを独自に作成し評価を行った[5]。本報告ではこのプログラムを[5]で得られた被験者の感想や実験の結果を元に改善したものを使用する。本実験で使われる実験プログラムとオリジナルのCam Treesとの間で異なると思われる部分を以下に挙げる。

- (1) オリジナルは3D roomに配置され背景や影などがあるが、実験用は省略する。
- (2) マウス操作を独自に設定した。左ボタンで選択、中央ボタンでコーンのガーデニングである。
- (3) 実験用のノード内に書かれる文字は、そのノードが子ノードを持たない場合は緑色、持つ場合は黄色で表示する。
- (4) オリジナルではノードの移動や、メニューによる特定ノードの検索等が可能であるが、実験用は評価実験に必要な機能は省略する。

また、従来の実験用プログラム[5]から改善、変更した部分を以下に挙げる。

- (1) 従来の実験用プログラムは、選択されたノードが常に画面中央に来る。そのため頂点の位置は変化し、ツリー全体が前後左右に移動する。本実験用プログラムはオリジナルと同様に頂点は

固定する。

- (2) 本実験用プログラムは前述のように回転方法、回転速度は変更可能である、(従来は回転時間が一定。)
- (3) 従来プログラムでは現在の選択部分が最適に表示されるように動的に計算されるため、コーンの半径が変化する。本実験用はオリジナル同様、ツリー全体がバランスよく配置されるように最初に位置計算をしており、ガーデニング等で全体の形やコーンの半径は変わらない。

3.3 実験1

3.3.1 実験1A

評価実験1Aでは、三つの回転方式について、各々の最適速度を求めめるための実験を行い、被験者のパフォーマンスと主観評価から各回転方式の最適速度を検討する。

実験方法

被験者はCam Treesを操作し、提示されたノードを探索しポインティングするというタスクを行った。1タスクは次のような手順で行われた。

1. 被験者に、目標ノードをフルパス名(目標ノードに至るまでのすべてのノード名)でダイアログボックスを使って提示する。
2. 被験者はダイアログボックスをクリックして消してから、画面に提示されているCam Treesを操作し目標ノードを探索する。目標ノードはダイアログボックスを閉じた後も画面上方に提示した。
3. 目標ノードを発見しクリックすると1タスクは終了する。続いて、次のタスクがあれば、次の目標ノードを示すダイアログボックスが提示される。その際、Cam Treesの状態は初期状態にせず、タスク終了時の状態を残したまま次のタスクへ移行する。

なお、15タスクを実験の1セッションとする。

実験は、時間一定方式、角速度一定方式、線速度一定方式について、それぞれ独立に行った。

時間一定方式、角速度一定方式の実験は12セッション、線速度一定方式の実験は7セッションで構成した。

各セッションには、全て異なる回転速度を割り当てた(表1)。表1では、時間一定方式は[フレーム数]、角速度一定方式は[回転角度/1フレーム]、線速度一定方式は[移動距離(mm)/1フレーム]で示す。ここでは1フレームを1/60秒とする。これらの値は予備実験で決定した。

被験者が受ける、各回転方式の実験の順番はランダムであり、また実験内のセッションの順番も被験者にとってランダムであった。

表 1: 実験1Aの実験セッション

時間一定	40	54	68	82	96	110	124	138	152	166	180	194
角速度一定	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0	6.5
線速度一定	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4	1.6				

時間一定方式: フレーム数
角速度一定方式: 度/フレーム
線速度一定方式: mm/フレーム

実験中、1タスク毎にタスク達成時間と要したマウスボタンのクリック数を計測した。また1セッションが終わる度に、被験者は回転速度[遅い(1)ー速い(7)], 操作感[不快(1)ー快適(7)], 好感度[嫌い(1)ー好き(7)]について7段階の主観評価を行った。

実験に使用した木構造データはノード数42、頂点を含めて4階層であった。木構造の学習を防ぐために、セッション毎にノード名を適宜に置き換えた。Cam Treesは最初から全て開いて提示し、コーンの開閉(ガーデニング)を出来ないように設定した。これはガーデニングによる木構造の変化が、被験者の回転の感じ方に影響することを防ぐためである。目標ノードは木構造データから選んだ四つのノード系列をセッション毎にランダムに変えて被験者に提示した。

被験者はWSを日常使用している本学学生16名を採用した。

各回転方式の実験の間に5分間の休憩をおいた。実験の所要時間は全体で約1時間半であった。

実験を始める前に実験の内容と実験用プログラムの使用法を実際にプログラムを使って教示した。

実験結果と考察

各回転方法セッションについて、速度グループ毎に記録項目であるタスクにかかった総時間と総クリック数(それぞれ15タスクの合計)と主観判断の評定値(MOS)を被験者平均で表2, 3, 4に示す。

各記録項目毎に、最適な値について考える。タスクにかかる総時間については、短いほど、総クリック数は少ないほど良いと考える。主観評定値のうち、速度に関しては中庸な値4が、操作感と好感度に関しては最大の値7が一番良いと考える。

各回転方式別にこれらの考え方によって値を検討すると、表2,3,4において網掛けの部分が実験の結果における最適値となる。各記録項目毎ではばらつきがあるが、時間一定方式の最適値は各々40から82、角速度一定方式は2.0から4.0、線速度一定方式は1.2から1.6の範囲に存在する。これらより次のことがいえる。

- 各回転方式で総タスク時間と操作感・好感度の最適値はほぼ同じ速度である。(時間一定方式: 40から54付近, 角速度一定方式: 4.0付近, 線速度一定方式: 1.4から1.6付近)
- 各回転方式で総クリック数の最適値と主観速度の中庸値はほぼ同じ速度である。(時間一定方式: 68から82付近, 角速度一定方式: 2.0付近,

表 2: 実験1Aの時間一定方式の結果 (被験者平均)

フレーム数	総タスク時間	総クリック数	主観速度	操作感	好感度
40	80.53	28.63	4.69	4.50	5.00
54	120.66	37.00	4.19	4.81	4.31
68	89.48	26.69	3.88	4.44	4.88
82	92.83	25.44	3.63	4.25	4.19
96	117.36	29.69	3.63	4.31	4.31
110	106.97	26.63	3.13	4.44	4.63
124	113.87	26.75	3.31	4.38	4.50
138	159.85	33.81	3.00	4.25	4.31
152	134.20	27.19	2.44	4.31	4.44
166	152.40	28.81	2.81	3.94	4.31
180	147.77	26.81	2.69	4.06	4.31
194	147.07	26.56	2.13	3.56	4.19

総タスク時間：秒，主観速度・操作感・好感度：平均評定値

表 3: 実験1Aの角速度一定方式の結果 (被験者平均)

回転角	総タスク時間	総クリック数	主観速度	操作感	好感度
1.0	100.98	28.50	2.69	3.75	3.875
1.5	112.38	36.56	3.25	4.19	4
2.0	73.98	27.31	4.00	4.19	4
2.5	77.68	29.50	4.81	5.06	4.94
3.0	88.31	35.75	5.06	5.06	5.0
3.5	70.94	28.44	5.31	5.19	4.94
4.0	66.81	29.93	5.38	5.50	5.25
4.5	88.27	37.81	5.56	5.38	5.00
5.0	71.21	30.06	6.06	4.81	4.63
5.5	79.50	35.94	5.88	5.13	4.69
6.0	84.44	36.44	6.25	5.13	4.88
6.5	71.20	31.94	6.25	4.69	4.13

総タスク時間：秒，主観速度・操作感・好感度：平均評定値

表 4: 実験1Aの線速度一定方式の結果 (被験者平均)

移動距離	総タスク時間	総クリック数	主観速度	操作感	好感度
0.4	147.07	28.00	1.94	3.31	3.75
0.6	132.16	31.44	2.81	3.50	3.94
0.8	95.94	27.38	3.38	4.31	4.50
1.0	90.58	28.13	3.75	4.19	4.56
1.2	117.44	34.63	4.13	4.38	4.19
1.4	74.71	24.94	4.25	4.38	4.5
1.6	81.67	29.00	5.00	5.07	4.93

総タスク時間：秒，主観速度・操作感・好感度：平均評定値

線速度一定方式：1.2から1.4付近)

- どの回転方式でも主観速度の最適値と操作感、好感度の間の最適値に多少ずれがある。
- 上記の結果から、被験者は総タスク時間が一番短いときに操作感、好感度が最大になる。この時、主観速度は若干速め(5付近)で総クリック数が最小時より多少増えている。総クリック数が最小時、主観速度が中庸である、このことより被験者にとって中庸な速度とはクリックが最もしやすい速度であると考えられる。

これらの結果より、各回転方式の最適速度は主観速度が中庸である場合と操作感・好感度が最大の場合の2通りが考えられる。

3.3.2 実験1B

評価実験1Bでは、回転の最適方式を求めるため

に、実験1Aから得た結果を元に、三つの回転方式について最適値を適用した上で比較実験を行い、被験者の主観の評価から最適方法を検討する。

実験方法

被験者は実験1Aと同様にCam Treesを操作し、提示されたノードを探索しポインティングするというタスクを行った。1タスクの手順も実験1Aと同様であった。

被験者は三つの回転方式から得られる回転方式の対を比較した。回転方式の対は(時間一定・角速度一定)(角速度一定・線速度一定)(線速度一定・時間一定)の3種類であった。まず対の一方の方式でタスクを5回行い、続けてもう一方の方式でタスクを5回行った。その直後にどちらの方法が良いか判断した。この三つの対の組を1セッションとする。

被験者はセッションを4回(計12対)行った。4回のセッションのうち半分は対の提示の順番を前後を逆に入れ替えた。これは提示順番による順序効果を打ち消すためである。

実験中、1タスク毎に時間とクリック数を計測した。また、1対毎にどちらの回転方式が良いかの主観評価を行った。

実験1Aの結果から、各回転方式における最適速度は、主観速度が中庸である場合と操作感・好感度が最大の場合の2通りが考えられるが、ここでは両者の中間付近の値から選んだ。時間一定方式は54(フレーム数)、角速度一定方式は2.5(度/フレーム)、線速度一定方式は1.5(mm/フレーム)を選択し、設定した。

実験に使用した木構造データは実験1Aと同様に、ノード数42、頂点を含めて4階層であった。また、木構造の学習を防ぐために、1対毎にノード名を適宜に置き換えた。Cam Treesは最初から全て開いて提示し、コーンの開閉(ガーデニング)を出来ないように設定した。これは実験1Aと同様に、ガーデニングによる木構造の変化が、被験者の回転の感じ方に影響することを防ぐためである。目標ノードは木構造データから選んだ四つのノード系列を1対毎にランダムに変えて被験者に提示した。

被験者は実験1Aを受けた本学学生16名を後日、採用した。

実験は休憩なしで連続して行った。実験の所要時間は全体で約30分であった。

実験結果と考察

三つの回転方式のうちどれが一番良いかという判断は1セッションの三つの対の判断の結果の組み合わせから導く。被験者16人は4セッション判断した。その結果を表5に示す。被験者が一番良いと判断した回数が最も多かったのが線速度一定方式で64回中21回であった。次いで角速度一定方式が18

表 5: 実験1Bの実験セッション毎の最適回転方式

被験者	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1	×	角	線	線	角	×	×	線	×	角	線	×	×	×	時	時
2	角	線	×	線	角	角	角	時	×	×	線	線	線	角	時	
3	線	時	角	×	線	時	線	角	時	×	×	線	角	角	時	時
4	線	線	×	線	角	線	角	角	角	×	角	線	線	線	線	時

各セルは被験者が1セッション(3対)で判断した最適な回転方式を示す
 時：時間一定方式 (10回), 角：角速度一定方式 (18回)
 線：線速度一定方式 (21回), ×：一巡三角形 (15回)

表 6: 実験1Bの被験者の各一対比較の結果

	時間一定	角速度一定	線速度一定	合計
時間一定			20	41
角速度一定	44		29	73
線速度一定	43	35		78

試料数 $k=3$, 判断数 (被験者数) $n=64 (16 \times 4)$

回, 時間一定方式は10回であった。また判断が一巡三角形の状態になってしまい3方式間でどれが良いかの判断が付かなかった場合が15回あった。

次に個々の一対判断の結果を表6に示す。表の各セルの数字は、行と列の方式を比較して列の方式の方が優れていると判断した数である。この表を元に、一対比較の一致性の係数(coefficient of agreement)を求めると、資料数 $k=3$ (3回転方式) 判断数 $n=64$ (16人の被験者が4回判断) から $u=0.075$ となる。この値について検定したところ、被験者16人は判断に関してなんらかの一致があると考えられる。($\chi_0^2=34.42, \chi^2(3,0.05)=7.81$)

また、ブラッドレーの方法により、各回転方法が一番良いと判断される判定比を推定すると、推定値はおおよそ $\pi_{時間一定}=0.19, \pi_{角速度一定}=0.38, \pi_{線速度一定}=0.43$ となる。この比率で被験者は回転方式を選択したといえる。従って、この値が大きいほど被験者にとって好ましい方式と考えられ、線速度一定が被験者にとって一番良い方法であるといえる。判定比を使って被験者の回転方式に関する嗜好の差を検定したところ、回転方式間には差があった。($\chi_0^2=17.18, \chi^2(2,0.05)=5.96$)

また、総クリック数と総タスク時間は被験者平均で、時間一定方式は(11.64, 35.97), 角速度一定方式は(11.28, 32.50), 線速度一定方式は(11.52, 32.61)であった。

以上の結果より、回転に関して、線速度一定方式が被験者にとって最も適した方式であることが分かった。

前回の実験の感想やビデオ・ログの分析より、被験者がアニメーションに関して、ひっきりや戸惑いを見せたのは次のような場面であった[5]。

- アニメーションが速すぎる場合。
- アニメーションが複雑で動きの予測が出来ない場合。(アニメーションの方針が理解できない。)
- アニメーションがちらつく場合。

表 7: 実験2の実験セッションのノード数

	2階層	3階層	4階層	5階層	6階層
3分木			121	364	1093
4分木		85	341	1365	
5分木		156	781		
6分木		295	1555		
7分木	57	400			
8分木	73	585			

実験はノード数50から1500程度のノード数を対象
 斜線部分は実験を行わず

従って被験者にとって適切なアニメーションとは次のように考えられる。

- 動きが予想しやすいこと。(アニメーションが単純であること。)
- 動きが目で追えること。
- 動く方針が出来るだけ一定すること。

これらの条件を一番満たしている方式は線速度一定であると考えられる。

時間一定方式は確かにアニメーション時間は一定であるが、同じコーン内の操作でも手前のノードを選択する場合と奥のノードを選択するときアニメーションの動きが変わる。例えば手前のノードが最適な速度でも、奥のノードが速すぎて目追えない場合もあり、動きの予測は困難である。

角速度一定の場合は一つのコーン内の操作に関しては、動きが変わらない。半径の違うコーンに関しては、動きの速さが変わる。そのためあるコーンが最適な速度であっても、他の半径の異なるコーンで速度が最適であるとは限らない。これらの事が実験1Bの結果に現れたと考える。

また、被験者の判断が一巡三角形となる場合が15回あったことや、被験者の実験後の感想から、実験1Bの一対比較はかなり難しかったことが分かった。

3.4 実験2

評価実験2では、ノード数(階層数・子ノード数)の変動による、被験者のパフォーマンスを計測する。

実験方法

被験者は実験1と同様に、Cam Treesを操作し、提示されたノードを探索しポインティングするというタスクを行った。1タスクの手順も実験1と同様であった。なお、30タスクを実験の1セッションとする。

実験は14セッション行われた。各セッションには、階層数・子ノードの数(n 分木)の組み合わせで決まるノード数をそれぞれ割り当てた(表7)。なお、階層数は頂点ノードを含めない。これらのノード数は[5]を踏まえ、50から1500の範囲であっ

表 8: 実験2の結果

	2階層	3階層	4階層	5階層	6階層
3分木			74.29 144.25 1.94	109.57 203.96 1.86	180.29 320.42 1.78
4分木		70.86 135.49 1.91	102.57 194.26 1.89	132.00 269.99 2.05	
5分木		82.43 178.20 1.94	89.85 171.09 1.90		
6分木		92.57 187.63 2.16	122.71 233.96 1.91		
7分木	50.71 96.77 1.91	108.29 224.93 2.02			
8分木	60.29 119.39 1.98	100.43 220.08 1.89	上段: 総クリック数 中段: 総タスク時間 (秒) 下段: 1クリックあたりの時間		

た。被験者が受ける、セッションの順番はランダムであった。

実験中、1タスク毎に時間とクリック数を計測した。

ツリーは各セッションの初めに頂点ノードのみが提示され、被験者はコーンの開閉（ガーデニング）操作によって、目標ノードを検索した。目標ノードは、実験で被験者がなるべく木全体を見る必要があるように、木構造データから階層や場所がらばらるように選んだノード系列をセッション毎に用意した。また、実験に使用したCam Treesの回転方式は実験1で得られた値を用い、線速度一定で1.5mm/フレームの速度であった。

被験者はWSを日常使用している本学学生7名を採用した。実験半分にあたる7セッション目の後に5分間の休憩をおいた。実験の所要時間は全体で約1時間であった。

実験を始める前に実験の内容と実験用プログラムの使用法を実際にプログラムを使って教示した。

実験結果と考察

各セッションについて、タスクにかかった総時間と総クリック数の被験者平均を表8に示す。総クリック数、総時間ともノード数に必ずしも比例していないことが分かる。1クリックあたりにかかる時間を計算すると、平均1.97秒で1.78から2.16まで開きがあった。大まかに見ると総タスク時間は総クリック数で決定することがいえる。階層数と子ノード数について着目すると、階層数が増えるに従って、子ノードが増えるに従って総時間、総クリック数も増加している。従って被験者のパフォーマンスはツリーの階層数と子ノード数により大まかに決定されると考えられる。これらの結果は、被験者がノード探索の方針として、まず指定された階層に行き、それからコーンを同定し、ノードを発見するという手順を踏んでいることを暗に示

唆している。

しかし、実験結果を細かくセクション毎に見ていくと、上記の方針に適合しない場合もある（例えば階層4、ノード数5の時）。この原因の一つとしては、Cam Treesは3Dの採用によって目標ノードが直接クリックできる場合が多いことが考えられる。

4 終わりに

本報告では、3DUIの基本的特性をより明確にし、3DUIの有効性をさらに向上するために、Cam Treesの回転のアニメーション方式とその最適速度の検証とCam Treesのノード数によるパフォーマンスに関する評価実験を行った。

その結果、回転に最適なアニメーション方式に関しては、線速度一定方式が最適であることを示し、その最適値を導いた。またCam Treesのノード数による被験者のパフォーマンスの変移がクリック数におおむね比例し、クリック数は階層数と子ノード数によって大まかに決まることが明らかになった。

回転方式を比較する実験において、予備実験で選んだ速度の範囲は、被験者の動向を見るためには少し狭かった。より詳細な検証のためにはもう少し広い範囲で評価を行う必要がある。

謝辞

実験用プログラム開発に協力していただいた、大阪大学基礎工学部の藤本典幸氏、並びに本学情報科学研究科の大隈隆史氏に、また被験者として協力して頂いた、本学学生諸氏に感謝します。

参考文献

- [1] Card, S. K., Robertson, G. G., and Mackinlay, J. D. The Information Visualizer: An Information Workspace. In *Proceeding of CHI'91: Human Factors in Computing Systems*, New Orleans, Louisiana, pp.181-189. New York: ACM, 1991
- [2] Mackinlay, J. D., Robertson, G. G., and Card, S. K. Perspective Wall: Detail and context smoothly integrated. In *Proceeding of CHI'91: Human Factors in Computing Systems*, New Orleans, Louisiana, pp.173-179. New York: ACM, 1991
- [3] Robertson, G. G., Mackinlay, J. D., and Card, S. K. Cone Trees: Animated 3D Visualizations Of Hierarchical Information. In *Proceeding of CHI'91: Human Factors in Computing Systems*, New Orleans, Louisiana, pp.190-194. New York: ACM, 1991
- [4] Robertson, G. G., Mackinlay, J. D., and Card, S. K. Information Visualization using 3D Interactive Animation. In *Video Proceeding of CHI'91: Human Factors in Computing Systems*, Itasca, Illinois, Issue 63-1. SIGGRAPH Video Review: ACM, 1991
- [5] 土本光一, 竹村治雄, 片山喜章, 萩原兼一: 階層情報の3次元表示に関する実験的評価, 日本ソフトウェア科学会第11回大会論文集 pp.277-280