

トレイグジスタンス望遠鏡の提案

Telescopic Telexistence

柳田康幸, 鉄谷信二

Yasuyuki Yanagida and Nobuji Tetsutani

ATR メディア情報科学研究所

ATR Media Information Science Laboratories

ABSTRACT

Recently many Web cameras are found on the Internet and they often provide zoom function. The zoom function could be considered as a way to satisfy the user's desire for getting closer to the object of interest. For stereoscopic display environments, however, we cannot obtain natural depth perception of the object if we simply observe the stereo images captured by conventional stereo cameras with zoom optics. In this paper, we propose a method to realize the sensation as if the user got close to the specified object, though the actual cameras are located away from the object.

Keywords: telexistence, depth perception, telescope, stereoscopic display

1. はじめに

トレイグジスタンス[1]では, 操作者の頭部運動に対してロボット頭部を実時間で制御し, 遠隔環境を臨場的に体験し, 行動する. このとき, 遠隔環境を自然な三次元空間として操作者に知覚させることは重要な要素であり, これまでにステレオカメラ系と HMD[2][3]や固定スクリーン[4]などの立体画像提示システムを使用して操作者の頭部運動に対応した自然な立体画像を提示するための研究開発が行われてきた.

その一方で, 近年いわゆる Web カメラ, ネットワークカメラと呼ばれるものが多数設置されるようになった. これらは, ある意味でトレイグジスタンスのコンセプトを非常に簡略化した形により実現したものであると捉えることもでき, 単一カメラの画像を Web ブラウザに表示するとともに, 一部では Web ページに作り込んだボタンなどのインタフェースを通してカメラ制御を行っている. そこでは, パン・チルトによる見回し動作の他に, ズーム操作が普通に行われている. ユーザの立場から見ると, ズーム操作は単に画像を拡大して見たいというだけでなく, 遠くにある物体へ近づいて見てみたいというニーズを効果として実現する手段であるとも考えられる.

この「近づいてみたい」という欲求を, 三次元空間へ没入する型のトレイグジスタンスに適用しようとした場合, どのような構成をとりうるだろうか. 単一ズームカメラからの最も直接的なアナロジーでは, ステレオカメラ系を構成する左右それぞれのカメラのズーム倍率を制御する方法が考えられ, 実際にそのようなカメラ系も市販されている. しかしながら, 両眼立体視が有効になっている状態では, 単にカメラのズームを行っただけでは自然な奥行き感が得られない.

本研究では, 注目する物体の像の大きさ, 物体上代表点に関する輻輳角とその近傍の視差量を協調して制御することにより上記の問題を解決し, もって物体に近づいたかのような効果を視覚的に実現する方法を提案する. ただし, 提案する手法は指定した物体の近傍のみを対象として自然な奥行き感を実現するものであり, 空間全体に対して適用できる性質のものではない. この特性を幾何学的に解析し, 本手法の適用範囲について考察する.

2. 基本原理

対象物体から距離 D に配置したカメラにより得られた画像を用いて立体画像提示を行う場合, テレイグジスタンスの基本形, すなわちユーザの眼間距離と等しくカメラ間距離を設定したステレオカメラで撮影した映像を, ユーザの左右視点とスクリーン面との位置関係が各カメラの光学中心と撮像面との位置関係に等しくなるよう, か

柳田康幸

<yanagida@atr.co.jp>

ATR メディア情報科学研究所

〒619-0288 京都府相楽郡精華町光台 2-2-2

TEL 0774-95-1401, FAX 0774-95-1408

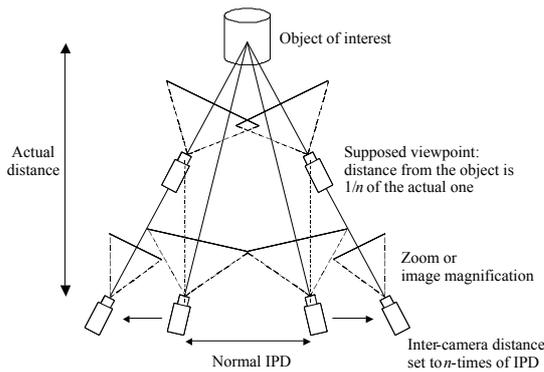


Fig. 1. Basic principle of telescopic telexistence

つ視野角が等しくなるよう提示すると、物体はユーザから距離 D の位置に知覚される。ここで物体が遠い場所にあり小さくてよく見えない場合、物体に近づいて見たいと思うのは自然な欲求であろう。

このとき、カメラ系や提示デバイスの配置をそのままに、単に提示画像をズームして拡大したのでは、物体の奥行き方向に関する立体感が不自然になる。例えば、平行光軸系のステレオカメラとHMDの組合せを利用する場合、提示画像を拡大ズーム（像の大きさを n 倍に）すると、輻輳から算出される物体までの距離は確かに $1/n$ になるが、すべての点が同じ変換を受けるため世界全体が奥行き方向に圧縮され[5]、物体の奥行き方向のサイズも $1/n$ に縮小して観察される。したがって、対象物体近傍の自然な奥行き感提示を実現するには視差量を n 倍にする必要がある。これを実現する直接的な方法の一つは、カメラ間距離を n 倍にすることである。

以上をまとめると、カメラからの距離 D に位置する対象物体を D/n の位置に引き寄せたかのように見せるための方法は、次のようになる (Fig. 1)。

- (1) ステレオカメラ間距離をユーザの眼間距離の n 倍にする。（視差制御）
- (2) 注目物体上の代表点への輻輳角が提示距離 D/n に相当するよう画像の提示位置を調整する。（輻輳角制御）
- (3) 上記代表点を中心にして n 倍に拡大ズームした画像を提示する。（像の大きさ制御）

実は、この原理のうちポイント(1)に関連するアイデアは実用新案[6]に見られる。しかし、物体の自然な立体感提示を議論するには本来撮像系と提示系の組合せで論じる必要があるにもかかわらず、この実用新案では撮像系でカメラ間距離を拡大し、ターゲット物体を視野中心に捉えるようカメラの輻輳角を制御するという撮像系の

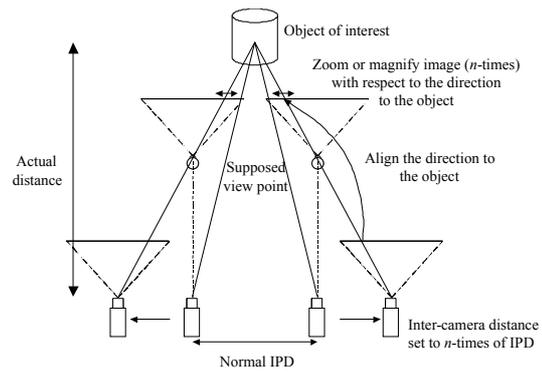


Fig. 2. Configuration using parallel-axis optics

アイデアだけが記載されており、それだけでは効果を見積もることができない。

そこで本稿では、画像提示系との対応を考慮して手法の検討を行う。その際、カメラの輻輳制御を要求しない平行光軸系を基本とすることにより、解析の見通しを良くし本原理により得られる効果と問題点を明らかにする。

3. 平行光軸系による構成

撮像系として輻輳をつけたカメラを使用した場合、ユーザが観察する画像の輻輳と視差を厳密に合わせるためには画像提示面の方向もカメラの輻輳角に同期して制御する必要がある。一般に視覚ディスプレイでは画像提示面は普通固定であり、さらに液晶シャッター方式などで左右用の提示面を共有する場合には輻輳をつけることができないといった事情があるため、輻輳カメラ系はこうしたディスプレイ上で正確な実写画像の立体提示を行う際に適しているとは言えない。

そこで、本稿ではカメラの輻輳制御を陽には要求しない平行光軸系による構成を検討する。カメラの輻輳角制御の役割は対象物体を画像の中心に捉えることであり、提示系と併せて立体視に対する効果を考えると、対象物体への輻輳角をディスプレイ面の距離に合わせることに他ならない。つまり、カメラの視野中央で捉えた点がディスプレイ面の中央に表示されるため、この点に関しては提示面上での視差がなく、従って物体はちょうど画像提示面上に位置するよう提示される。これと同等の効果を平行光軸系で実現するには、左右用画像を平行移動させて、狙った点への輻輳角を制御すればよい。画像提示面上で視差がゼロになるよう平行移動すればその点はちょうど画像提示面の距離に提示され、さらに、狙った点の奥行きをディスプレイ面の前後どちらに設定することも可能である。

このように画像の提示位置制御と拡大操作を

行えば、物体を手元に引き寄せたかのような効果が得られると期待するかもしれない。しかし、これだけでは問題がある。すなわち、視差は距離の2乗に反比例するため、遠方で撮影したステレオ画像の重なり方を制御して輻輳が距離 $1/n$ 相当になるよう、かつ画像サイズを n 倍に（これも距離 $1/n$ に対応）拡大して提示しても、撮影した元のステレオ画像に含まれる視差が $1/n^2$ 相当のため書き割り効果が生じ[7]、結果として対象物体近傍の奥行きは $1/n$ 倍になってしまう。

この問題の解決法の一つは、カメラ間距離の拡大により視差量を確保することである。実際の距離の $1/n$ の距離から観察しているかのように見せるためには、カメラ間距離を標準の n 倍に拡大すればよい。このとき、対象物体から見るとちょうどステレオカメラが接近した場合と同一方向に並ぶことになる。提案手法を Fig. 2 に示す。

4. 空間歪みの分析

前述の方法により対象物体への接近を模擬すると、対象物体近傍では輻輳と視差がほぼ正しく再現されるが、物理的に接近した場合はそもそもカメラの視点が異なるので、空間全体が自然な3次元空間として表現される訳ではなく、歪みが生じる。以下にこの様子を解析する。

Fig. 3 のように、対象物体上の点 P_p (以後 pivot と呼ぶ) から距離 z_p の場所を想定観察位置（「近づいた」状態）とし、その両眼中央を原点とする。座標系は、右方向を x 軸、正面方向を z 軸とする。また、ある点への方位角を、正面方向と点への方向のなす角（反時計回りを正）と定義する。想定観察位置の左右視点（眼間距離 d ）における点 P_p への方位角をそれぞれ θ_{pL} , θ_{pR} とする。ここで、pivot から z 軸方向の距離が nz_p となる位置にカメラ

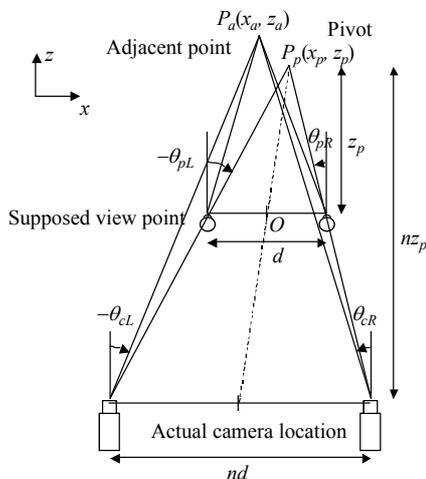


Fig. 3. Supposed view point and actual camera location

間距離を nd に設定したステレオカメラを配置する。左右カメラから pivot の近傍の点 P_a への方位角をそれぞれ θ_{aL} , θ_{aR} とする。このカメラで撮影した画像を、画像提示デバイスにおいて pivot 方向を中心に n 倍に拡大して提示する。なお、本方式では左右の視点からそれぞれの点への方向のみが重要であって、提示デバイスの種類(HMD, CRT, CAVE など) の相違は問題にならない。

さて、上記の pivot 点の方位角は

$$\tan \theta_{pL} = \frac{-x_p - d/2}{z_p} \quad (1)$$

$$\tan \theta_{pR} = \frac{-x_p + d/2}{z_p}$$

であり、カメラ視点から見た点 P_a への方位角は

$$\tan \theta_{aL} = -\frac{x_a + (n-1)x_p + n \cdot d/2}{z_a + (n-1)z_p} \quad (2)$$

$$\tan \theta_{aR} = -\frac{x_a + (n-1)x_p - n \cdot d/2}{z_a + (n-1)z_p}$$

である。画像提示デバイスにおいて、pivot を中心に画像を n 倍に拡大して表示すると (Fig. 4), カメラ画像上の点 P_a は提示側では方位角が

$$\tan \theta_{vL} = \tan \theta_{pL} + n(\tan \theta_{aL} - \tan \theta_{pL}) \quad (3)$$

$$\tan \theta_{vR} = \tan \theta_{pR} + n(\tan \theta_{aR} - \tan \theta_{pR})$$

の点 P_v として表示される。 P_v は左右それぞれの視点（間隔 d ）から(3)式の方位角に線を引いて交わる点であり、その座標 (x_v, z_v) は

$$x_v = \frac{(n-1)(z_p - z_a)x_p + n \cdot z_p x_a}{(2n-1)z_p - (n-1)z_a} \quad (4)$$

$$z_v = \frac{(n-1)z_p + z_a}{(2n-1)z_p - (n-1)z_a} \cdot z_p$$

と計算される。また分母の値より、本方式による両眼融像可能範囲は

$$z_a < \frac{2n-1}{n-1} z_p \quad (5)$$

であり、これより遠方の点は立体視できないことがわかる。

本方式の目的は pivot 点付近の物体の大きさと奥行きを自然な状態に保つことであるが、この効

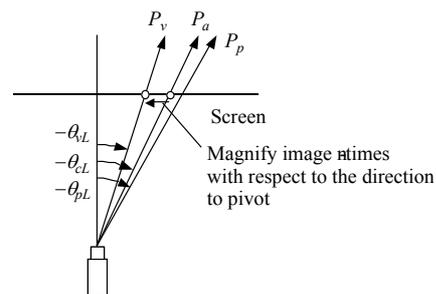


Fig. 4. Zooming/magnification of the image

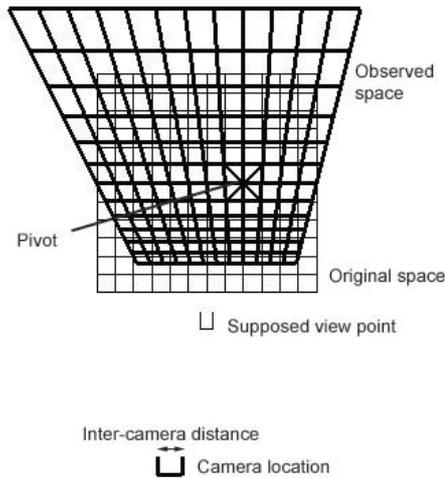


Fig. 5 Distortion of the world due to the difference of view point

果を調べるため pivot 点からの座標の差分を計算する. 点 P_a, P_v の座標の差分をそれぞれ, $\Delta x_a = x_a - x_p, \Delta z_a = z_a - z_p, \Delta x_v = x_v - x_p, \Delta z_v = z_v - z_p$ とすると, これらの関係は次のようになる.

$$\Delta x_v = \frac{\Delta x_a}{1 - \frac{n-1}{n} \cdot \frac{\Delta z_a}{z_p}} \quad (6)$$

$$\Delta z_v = \frac{\Delta z_a}{1 - \frac{n-1}{n} \cdot \frac{\Delta z_a}{z_p}}$$

これにより, 近傍点の奥行きが pivot 点と同じ点 ($\Delta z_a = 0$) は近くで観察する場合と全く同じ位置に見え, pivot 点近傍では $\Delta z_a \ll z_p$ となるため $\Delta x_v, \Delta z_v$ はそれぞれほぼ $\Delta x_a, \Delta z_a$ に等しく, 物理的に接近した場合と同等の効果が得られることが確認される. その反面, z 軸方向に pivot 点から離れている点に関しては, 手前側は圧縮, 遠方は膨張して観察されることがわかる.

提案手法による空間全体の歪みの様子を(4)式により計算した様子を Fig. 5 に示す. ここでは, pivot を想定視点から前方 80cm, 右 20cm の位置に, ズーム倍率を 2 倍に設定している. 図中の格子は一边 10cm である. 空間全体は pivot 点までの奥行きとの差に応じて歪みが生じるものの, 設定した pivot 点近傍ではほぼ実際のサイズ・奥行きとして観察されることが確認できる.

5. 考察

提案する手法を用いると, 物理的に対象物体へ接近しなくても等価的に近くへ寄って観察する効果が得られると期待される. 両眼手がかりは眼間距離 65mm に対して数 m の範囲をカバーする

ので, カメラの眼間距離を数 cm 変化させることで前後方向に最大数 m 移動する効果が得られ, その倍率は数十~100 倍程度である. このため, 対象に近寄れないような状況で採用する以外に, 瞬時に遠方の物体へ接近するかのような効果を期待できる.

また, 本方式では前述のように対象物体近傍以外の周辺空間が歪んでしまうという制約が存在するが, これをあえて利点として捉えるならば, 対象物体の背後の物体を遠方へ飛ばし, 対象物体のみを浮き上がらせる効果があると考えられる. 手前側に関しては, 対象物体が見えているのだから, 基本的に何も無い空間であるであり, 歪みはそれほど邪魔にならないことが期待される.

空間歪み以外の短所としては, 本方式をユーザの運動に対応したトレイグジスタンスへ適用する場合, 見回し動作や物体の覗き込み動作に関しては逆にズーム倍率の分だけカメラを大きく移動させる必要があり, ズームしたままの運動にはあまり適していないことが指摘される.

6. まとめ

立体画像撮像・提示システムにおいて, 物理的に物体へ接近しなくても同様の効果が得られる手法を提案・検討した. 本手法は世界の三次元情報や距離計測を必要とせず, 不完全ながら物体に近づいたかのような効果を視覚的に実現するものである. 今後はシステムを試作して, ロボットシステムなどへの搭載を検討する.

参考文献

- [1] 館: 人工現実感, 日刊工業新聞社, 1992.
- [2] 館, 阿部: テレイグジスタンスの研究 第1報-視覚ディスプレイの設計-, 第21回計測自動制御学会学術講演会予稿集, pp. 167-168, 1982.
- [3] 前田, 荒井, 館: 頭部運動追従型両眼視覚提示装置の設計と評価, 日本ロボット学会誌, Vol. 10, No. 5, pp. 655-665, 1992.
- [4] 柳田, 前田, 館: 固定スクリーン型視覚提示装置を用いたテレイグジスタンス視覚系の構築手法, 日本バーチャリアリティ学会論文誌, Vol. 4, No. 3, pp. 539-547, 1999.
- [5] 柳田, 館: HMD型テレイグジスタンスシステムの頭部運動時における視野角不整合の影響, 日本バーチャリアリティ学会論文誌, Vol. 7, No. 1, pp. 69-78, 2002.
- [6] 中川, 三木, 北地, 竹内: 立体画像の表示装置, 実開平 5-15592, 1991.
- [7] 繁樹, 佐藤: 両眼立体視における奥行き対比と観察距離の効果, ヒューマンインタフェース学会研究報告集 Vol. 1, No. 2, pp. 81-86, 1999.