

# Anamorphicon を利用した テレビ会議システムの提案の実装

柳川 優子<sup>1,a)</sup> 的場 やすし<sup>2,b)</sup> 椎尾 一郎<sup>1,c)</sup>

**概要：**テレビ会議システムの研究において、直接会って話した時と同様の存在感を表現する手法が多数提案、実装されているその一つに、遠隔参加者を会議空間に仮想的に実体化させる手法がある。例えば、テーブル上に小型のカメラ付きディスプレイデバイスを遠隔参加者の数だけ配置し、それぞれに遠隔参加者の顔画像を表示し、カメラの映像を相手に送る研究が知られている。会議空間における席次関係、視線の把握・コントロールなどが行えるメリットがあるものの、複数の表示装置を用意し保守するコストが必要になる。本研究では、大きな表示面を上部に備えた静電容量式のタッチディスプレイの利用を前提に、その上に置いた鏡面円筒に遠隔参加者の映像を表示することで、参加者の視線と立ち位置を把握・制御できる会議システムを提案・実装した。その実装にあたり、筆者らが開発している Anamorphicon デバイスを使用した。これにより、遠隔参加者の立ち位置をタンジブルに操作するテレビ会議システムが実現する。

**キーワード：**TV 会議システム、タンジブルユーザインタフェース、アナモルフォーズ

## Implementation and proposal of TV conference system using Anamorphicon

YANAGAWA YUKO<sup>1,a)</sup> MATOBA YASUSHI<sup>2,b)</sup> SHIO ITIRO<sup>1,c)</sup>



図 1 (左) 鏡面円筒アナモルフォーズ (右) Anamorphicon

### 1. はじめに

テレビ会議システムは、遠隔地の人物との対話や会議を行うために日常的に利用されている。しかし、実際の対話

と比べて臨場感や存在感が欠けていることがしばしば問題視されている。また、平面なディスプレイを通しての顔映像からでは、視線やジェスチャーなどの非言語情報が正確に読み取りにくく、対話に齟齬が生じると言われている [3]。これに対し、臨場感や存在感があり、視線情報などの非言語情報を読み取りやすくすることを目的としたシステムが提案されている [9], [10], [4]。

本論では安価でパッシブなタンジブルウィジェットである Anamorphicon[14] を用いたテレビ会議システムを提案、実装した。これにより、対話における臨場感や存在感を表現し、加えて視線方向を提示可能なシステムの実現を目指す (図 1)。

Anamorphicon とはアナモルフォーズというデザイン技法とマルチタッチ機能を利用したタンジブルなディスプレイウィジェットである。アナモルフォーズとは、ユーザーが歪んだ絵を見る角度を変える、鏡越しで覗くなどの動作によって、本来の正しい形の絵を見るデザイン技法である。

<sup>1</sup> お茶の水女子大学大学院 人間文化創成科学研究科

<sup>2</sup> お茶の水女子大学 理学部情報科学科

a) g1220541@is.ocha.ac.jp

b) y.matoba2011@gmail.com

c) siiio@acm.org

特に、鏡面円筒を用いるアナモルフォーズを鏡面円筒アナモルフォーズと呼び、Anamorphiconはこの技法を用いる。Anamorphiconを使うことによって、ディスプレイ上にアナモルフォーズに基づいて変形された画像を表示し、それを鏡面円筒の位置や回転角度の情報をもとに操作することを実現する。このAnamorphiconでの利用例としてはショッピングカタログアプリケーション [14] やパノラマビューアプリケーション [6] などがある。本研究ではテレビ会議システムに応用し、遠隔対話者の視線方向を提示可能な実物感のあるテレビ会議システムを構築する。

## 2. 関連研究

一般的に遠隔会議は、対話者間に対面会話ができないほどの物理的な距離が存在するときに利用される。それゆえに、臨場感や存在感のあるコミュニケーションを実現する技術が求められる。また、会話における言語以外の情報の伝達が豊かなコミュニケーションのための要素であり、それを損なわない技術も必要とされている。特に視線については、コミュニケーションにおける重要性が指摘されているが、従来のテレビ会議の手法では欠落しやすい情報として問題となっている [7], [2]。さらに、位置関係についても同様のことが言える。複数人数で行われる会話では、その位置関係によって心理的な影響がある。例えば二者間と言えば、近距離であるほど緊張感と親密感の両方が高くなることが示唆されている [18]。特に従来のテレビ会議システムでは、全遠隔ユーザーの顔が常に画面に表示されており、正面に向かい合う形で固定となるため、実際に映像を見ているユーザーがその場にいる時と比べて緊張してしまうと言われている [15]。

こうした課題を解決すべく、存在感や臨場感、視線情報、位置関係をテレビ会議システム上で表現ができるシステムが、多くの研究者によって開発された。下記に例をあげる。

- (1) 対話空間における臨場感を増すことを目的に、表現を工夫する試み [1], [5], [17]。
- (2) 対話者の存在感を増すことを目的に、物理的な装置を対話者の代理に見立てる試み [9], [12]。
- (3) 共同作業の効率を高めることを目的に、視線やジェスチャーなど、対話者の情報の提示方法を工夫する試み [16], [4], [8], [10]。

本研究は、(2)の対話者の存在感を増すことを目的に、物理的な装置を対話者の代理に見立てる研究の一つである。

物理的な装置を対話者の代理とする代表的な研究にHydra [12]がある。Hydraは小型のスクリーン、カメラ、マイク、そしてスピーカーを搭載した小型端末を遠隔対話者の代理として使用する。タンジブルに人の位置を操作することができ、会議のような配置も再現できるため、臨場感がでる。しかし、小型のデバイスを人数分用意する必要があるので、コストが高いと考えられる。また、LiveMask [9]

は対話者の顔形状を模した立体的な顔スクリーンに、対話者の顔をプロジェクションマッピングすることで、存在感のあるテレビ会議システムを構築している。頭の動きとスクリーンの動きが同期することから、視線情報の提示が可能である。しかし、顔形状は個人差があるため、汎用性は乏しいと考えられる。

本手法は、安価でパッシブなウィジェット Anamorphiconを用いたテレビ会議システムを提案する。Anamorphiconを遠隔対話者を表示させるディスプレイとして使用し、水平に設置した静電容量式のタッチディスプレイ上でユーザーの手でタンジブルに操作することができるため、相手の視線を動かすことができ、なおかつ、遠隔対話者を映したウィジェットを簡単に位置変更させることが可能となる。

## 3. 実装

Anamorphiconは、水平に設置した静電容量式のタッチディスプレイ上に置いて操作するタンジブルなウィジェットである。Anamorphiconの位置や回転角度に応じて、インタラクティブなコンテンツの提供が可能である。本章では、Anamorphiconを利用したテレビ会議システムの実装について述べる。また、このアプリケーションは、JavaScript, HTML5, WebGL, SkyWay\*<sup>1</sup> (WebRTCプラットフォーム) を使用して実装した。

### 3.1 システム構成

テレビ会議システムの構成を図2に示す。Anamorphiconを所持する側のユーザー(以下、ローカルユーザー)は、静電容量式のタッチディスプレイを水平に設置し、Anamorphiconを操作する。Anamorphiconには、遠隔地から会議に参加しているユーザーの画像(以下、遠隔ユーザー)が表示される。双方向テレビ会議の実現のためにAnamorphiconの上部にはウェブカメラを装着した。この映像は遠隔ユーザーに送信される。ローカルユーザーが複数の遠隔ユーザーとの会議を行う場合、複数のAnamorphiconが使用される。ローカルユーザーは、それぞれのAnamorphiconを移動させる、回転させることによって、遠隔ユーザーたちの位置関係および視線方向を操作することが可能である。

遠隔のユーザーが通常のテレビ会議に固定カメラを使用する場合、固定された一方からの映像のみがAnamorphiconに表示される。もし遠隔ユーザーの全周画像を取得できたならば、Anamorphiconの回転角度に応じた角度から遠隔ユーザーを見ることができ、そのため、より手で遠隔ユーザーを回している感覚を得ることにつながる。それを実現するために、図3に示すような、遠隔地のユーザーの全周画像を撮影するためのアームを取付けた装置を作成した。このアームの先端にはカメラが

\*<sup>1</sup> <https://nttcom.github.io/skyway/>

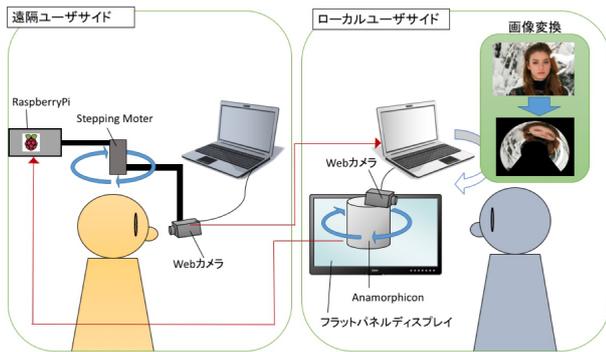


図 2 Anamorphicon テレビ会議システムの構成

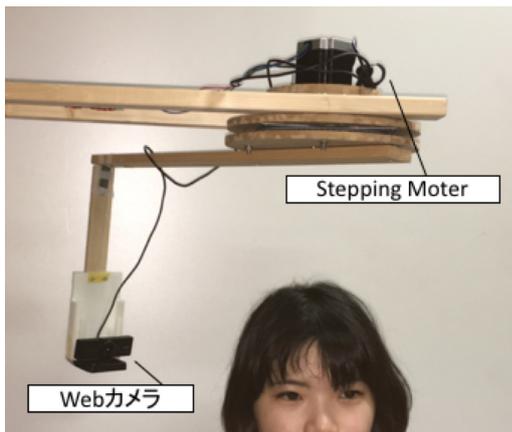


図 3 遠隔ユーザーサイドに設置するカメラアーム。ローカルユーザー側の Anamorphicon の回転角度に応じて回転する。

取り付けられており、アームが回転することによって、特定の方向から遠隔ユーザーを撮影することができる。アームは遠隔ユーザーの頭上の Stepping Moter に接続されている。ローカルユーザーが Anamorphicon を回転させると、Stepping Moter が Anamorphicon の回転角度に応じて回転し、回転した位置からの映像が Anamorphicon の鏡面円筒上に表示される。これにより、ローカルユーザーが Anamorphicon を遠隔ユーザーの代理として操作した時に、遠隔ユーザーの全周囲からの映像が表示され、操作しているリアルな感覚を得ることができる。

### 3.2 Anamorphicon

Anamorphicon は、水平に設置した静電容量式のタッチディスプレイ上でインタラクティブな操作が可能となる。Anamorphicon をタッチディスプレイの上に置くと、Anamorphicon の下にアナモルフォーズ技法に基づいて変形された画像が表示される。ユーザーが Anamorphicon の鏡面円筒を通してその変形された絵を覗くと、元の画像が鏡面円筒の中に立っているかのように見ることができる。

Anamorphicon の構造を図 4 に示す。クロームメッキしたアルミニウムパイプで作成した鏡面円筒(直径 7cm)の底面には、導電性材料(PLA 樹脂, Proto-Pasta 製: 体積抵抗値  $0.2 \Omega/\text{cm.}$ )により形成された 3 点のタッチパターンを

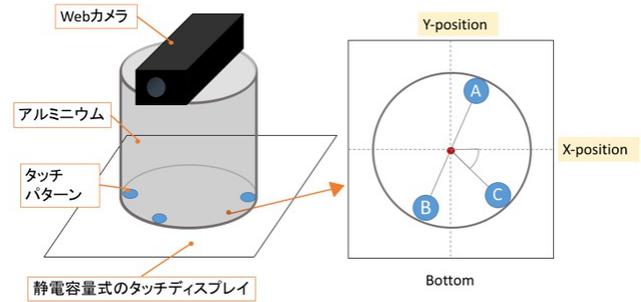


図 4 Anamorphicon の構造。ユーザーが鏡面円筒に接触した状態で、静電容量式のタッチディスプレイに接触すると、Anamorphicon の底の面に取り付けられた 3 点からなるタッチパターンが検出できる。



図 5 カメラを取り付けた Anamorphicon

設置している。この底部タッチパターンは Anamorphicon を構成するアルミニウム円筒に電氣的に接続されている。これを静電容量式タッチディスプレイ DELL (S2340T, 23inch) の上に置く。ユーザーが Anamorphicon に触れると、底部のタッチパターン部分の静電容量が変化し、タッチディスプレイがタッチイベントとしてこれを検出する。タッチパターンを形成する 3 つのチップ全てがタッチディスプレイに接触すると、図 4 のような、3 点(図 4 の ABC の点)からなるタッチパターンをシステムが検出する。このタッチパターンから、Anamorphicon の位置座標と回転角度を導くことができる。

遠隔ユーザーに映像を送出するために、Anamorphicon の上部に USB 接続のカメラ (Logicool 社, HD Pro Webcam C910,  $1920 \times 1080$  画素) を取り付けられた (図 5)。カメラを搭載した Anamorphicon の向きと、Anamorphicon に表示される遠隔ユーザー映像の向きを連動させることで、遠隔ユーザーの視線方向をローカルユーザーに直感的に提示することができる。

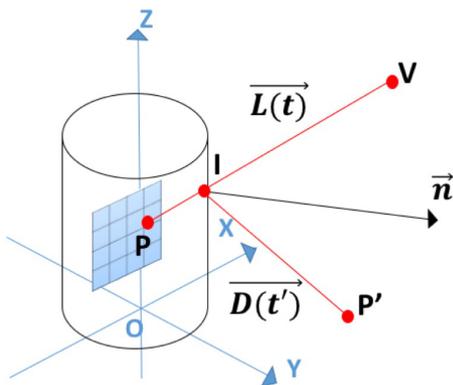


図 6 アナモルフォーズの計算 (条件設定).

## 4. 表示方法

アナモルフォーズでは、ユーザーは歪んだ画像の上に鏡面円筒を置き、鏡面円筒を通して本来の画像を見る。よって、アナモルフォーズ技法に基づいて歪ませた画像を生成する必要がある。本研究では、アナモルフォーズの計算 [13] に基づいて画像の変形を試みた。

### 4.1 アナモルフォーズの計算

図 6 のような 3 次元空間に配置された鏡面円筒のアナモルフォーズを考える。半径  $r (r > 0)$  の鏡面円筒の底面の中心を原点  $O$  におく。この時、円筒の底部が  $xy$  平面状に接しており、鏡面円筒の中心軸が  $z$  軸となる。視点  $\vec{V}$  を  $(v_x, v_y, v_z) (v_x, v_y > r, v_z > 0)$  とする。その時の虚像の点  $\vec{P}$  を  $(p_x, p_y, p_z)$  とおく。虚像の点  $\vec{P}$  のもととなる  $xy$  平面状の画像 (実像) 上の点  $\vec{P}'$  を  $(p_x, p_y, 0)$  とおく。本研究では、この点  $\vec{P}'$  が画像を分割するグリッドの交点となる。その求め方を 3 段階に分けて説明する。

#### step1. 反射点 $\vec{I}$ と反射点 $\vec{I}$ を通る法線ベクトル $\vec{n}$ を求める

最初に、虚像上の点  $\vec{P}$  と視点  $\vec{V}$  を結ぶ線分  $L(\vec{t})$  と鏡面円筒の表面が交わる反射点  $\vec{I}$  を求める。反射点  $\vec{I}$  は鏡面円筒の表面に存在するので、その  $x, y$  座標値には次の関係が成り立つ。

$$r^2 = x^2 + y^2 \quad (1)$$

また、線分  $L(\vec{t})$  は以下のように表すことができる。  $t$  は一意的に定まる係数である。

$$\begin{aligned} L(\vec{t}) &= \vec{P} + t(\vec{V} - \vec{P}) \\ &= (p_x + t(v_x - p_x), p_y + t(v_y - p_y), p_z + t(v_z - p_z)) \end{aligned} \quad (2)$$

式 (2) を式 (1) に当てはめ、線分  $L(\vec{t})$  が円筒の表面と交わる時の  $t (t > 0)$  の値を求める。

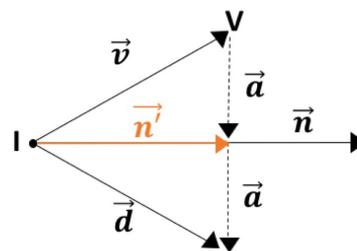


図 7 入射光と反射光からなる平面上のベクトル図.

$$\begin{aligned} r^2 &= x^2 + y^2 \\ &= p_x^2 + p_y^2 \\ &\quad + t(-2p_x^2 - 2p_y^2 + 2p_x v_x + 2p_y v_y) \\ &\quad + t^2(p_x^2 + p_y^2 - 2p_x v_x + v_x^2 - 2p_y v_y + v_y^2) \end{aligned} \quad (3)$$

式 (3) より  $t$  の値を求め、  $t_0$  とおく。それを式 (2) に当てはめることにより、線分  $L(\vec{t})$  と円筒の表面との交点  $\vec{I}$  を以下のように求める。

$$\begin{aligned} \vec{I} &= L(\vec{t}_0) \\ &= (p_x + t_0(v_x - p_x), p_y + t_0(v_y - p_y), p_z + t_0(v_z - p_z)) \\ &= (i_x, i_y, i_z) \end{aligned} \quad (4)$$

ここから、点  $\vec{I}$  を通る円筒の法線ベクトル  $\vec{n} = (i_x, i_y, 0)$  も求まる。

#### step2. 反射ベクトル $\vec{d}$ を求める

実像の点  $\vec{P}'$  を求めるにあたって、点  $\vec{I}$  からの反射ベクトル  $\vec{d}$  を求める。ここで、図 7 のようなベクトル図を考える。  $\vec{V}$  は視点、  $\vec{I}$  は反射点であり、  $\vec{n}$  は反射点での法線ベクトルである。反射光と入射光は、法線ベクトルに対して対称である。すなわち、入射光、法線ベクトル、反射光は同一平面上に存在する。図 7 は、この平面上を表している。反射点から視点までのベクトルを  $\vec{v}$  とし、これと同じ長さの反射ベクトルを  $\vec{d}$  とする。入射角と反射角は同じであるので、この図のように、  $\vec{V}$  から  $\vec{n}$  に下ろしたベクトル  $\vec{a}$  の 2 倍の場所に  $\vec{d}$  が来る。そこで、反射ベクトル  $\vec{d}$  を求める。図 7 から、  $\vec{v}$  と  $\vec{d}$  は以下のように表せる。

$$\vec{v} = \vec{V} - \vec{I} \quad (5)$$

$$\vec{d} = \vec{v} + 2\vec{a} \quad (6)$$

$$\vec{a} = \vec{n}' - \vec{v} \quad (7)$$

$$\vec{n}' = \frac{\vec{n} \cdot \vec{v}}{|\vec{n}|^2} \vec{n} \quad (8)$$

式 (7) と式 (8) から

$$\vec{a} = \frac{\vec{n} \cdot \vec{v}}{|\vec{n}|^2} \vec{n} - \vec{v} \quad (9)$$

を導く。式 (9) を、式 (6) に当てはめると、反射ベクトル  $\vec{d}$  は以下のように求められる。

$$\begin{aligned}\vec{d} &= \vec{v} + 2\vec{a} \\ &= \frac{2\vec{n} \cdot \vec{v}}{|\vec{n}|^2} \vec{n} - \vec{v} \\ &= (d_x, d_y, d_z)\end{aligned}\quad (10)$$

### step3. 実像の点 $\vec{P}'$ を求める

ところで反射ベクトル上の任意の点  $D(\vec{t}')$  は以下の通りに表せる。 $t'$  は一意的に定まる係数である。

$$D(\vec{t}') = \vec{I} + t'\vec{d}\quad (11)$$

そこで、式 (10) より求めた反射ベクトル  $\vec{d}$  を、式 (11) に当てはめることで、反射ベクトル上の任意の点  $D(\vec{t}')$  を以下のように表すことができる。

$$\begin{aligned}D(\vec{t}') &= (i_x, i_y, i_z) + t'(d_x, d_y, d_z) \\ &= (i_x + t'd_x, i_y + t'd_y, i_z + t'd_z)\end{aligned}\quad (12)$$

反射ベクトル上の点  $D(\vec{t}')$  において、 $z = 0$  で  $xy$  平面と交わる時の  $t'$  値を式 (12) から求めることで、実像の点  $P'$  が求まる。

$$i_z + t'd_z = 0\quad (13)$$

式 (13) から

$$t' = -\frac{i_z}{d_z}\quad (14)$$

が求められる。式 (14) を式 (12) に当てはめると

$$\begin{aligned}\vec{P}' &= D(\vec{t}') \\ &= (i_x - \frac{i_z}{d_z}d_x, i_y - \frac{i_z}{d_z}d_y, 0)\end{aligned}\quad (15)$$

以上から、視点  $V$  から鏡の虚像の点  $P$  を見た時に見える実像の点  $P'$  が求められる。

## 4.2 画像変形の高速化

前節のアナモルフォーズ計算に基づき、鏡面円筒に映した時に正しく見えるようにオリジナル画像を変形するプログラムを JavaScript を用いて試験的に開発した。この試験は、テレビ会議システムの実装に近い形で実施した。すなわちオリジナル画像はサーバに置かれ、サーバが JavaScript プログラムにより変換した結果がクライアントに送られる。オリジナル画像は、図 8 (左) に示す  $640 \times 426$  画素の画像であるこの全画素に対してアナモルフォーズ計算を行い、変換先の実数値座標に画素値を置き、次に変換先に必要な整数値座標での値を、最近傍法 [11] を使って計算した。処理速度を測定したところ、変換先の 1 画素につき約 0.02 秒の補正処理が必要となり、変換先の  $50 \times 50$  画素分の描画におよそ 1 分かかることが分かった。Anamorphicon の表示

エリアは  $780 \times 460$  画素程度であるので、実際の変換にはかなりの時間が必要である。

そこで、リアルタイムの会議システムでも使用可能な十分に高速な変換方式を導入した。この方式は、オリジナル画像を図 9 のように長方形に分割し、それぞれの長方形が変換される先の四角形をあらかじめ計算しておく。次に、オリジナル画像の長方形領域を変換先四角形にテクスチャマッピングする。テクスチャマッピング処理には WebGL のライブラリを使用した。それぞれの画素に対して JavaScript で計算を行った冒頭のプログラムと比較して、高速な処理が可能である。この結果、処理速度は劇的に改善され、後述するように約 50fps の変換が可能になり、実時間テレビ会議システムの動画変換に十分に使用可能な処理速度を得られた。

図 8 に本方式で変換した結果を示す。図 8 左に示す  $640 \times 426$  画素のオリジナル画像を、縦横それぞれ 50 分割しテクスチャマッピングにより変換し、図 8 中の変換結果を得た。図 8 右に示すように、この中心に鏡面円筒を置くと、オリジナル画像が正しく再現される。

分割数が少ない場合、分割した領域の接続部分で不連続性が目立つ問題点がある。図 9 に縦横 5 分割と 50 分割の例を示す。(以下、縦横  $N$  分割を  $N$  分割と表記する) 人物の顔のような自然画像では、50 分割あれば分割したことによる画質劣化はほとんど確認できないことがわかった。一方で、幾何学的なパターンは、自然画像に比べて分割の影響が現れやすい。

図 10 は、格子模様を 50 分割、100 分割で変換した結果である。正面部分での差はほとんど無いものの、50 分割変換の両端部分では線の折れ曲りが確認できる。この結果から、自然画像ならば 50 分割、幾何学的な画像でも 100 分割あれば十分な品質の変換が可能であることが確認できた。

## 5. 性能評価

開発したテレビ会議システムを評価するため、遠隔ユーザーのカメラ画像をアナモルフォーズ変換しローカルユーザーの Anamorphicon に表示する場合の性能評価を行なった。使用した機種は、ローカルユーザー側の PC は、Intel Core 2 Duo CPU 3.0GHz、メモリ 4GB、OS は Windows 8.1 Pro である。遠隔ユーザー側は、MacBook Air、intel Core i7 1.7GHz、メモリ 8GB である。どちらも同一のローカルネットワークに接続した。遠隔ユーザー側で撮影に用いるカメラは Macbook Air 内蔵の 720p FaceTime HD カメラ ( $1,280 \times 720$ ) である。遠隔ユーザー側のカメラ画像を、ローカルユーザーで受け取り表示した場合の毎秒フレーム数 (fps) を 50 秒測定した。この結果を図 11 に示す。グラフの縦軸が fps、横軸が接続後の経過時間 (秒) である。Original はアナモルフォーズ変換を行わない場合である。それ以外は本研究の方式でアナモルフォーズ変換した結果



図 8 オリジナルの画像（左）、変換した画像（中）、変形した画像を鏡面円筒に映した様子（右）。

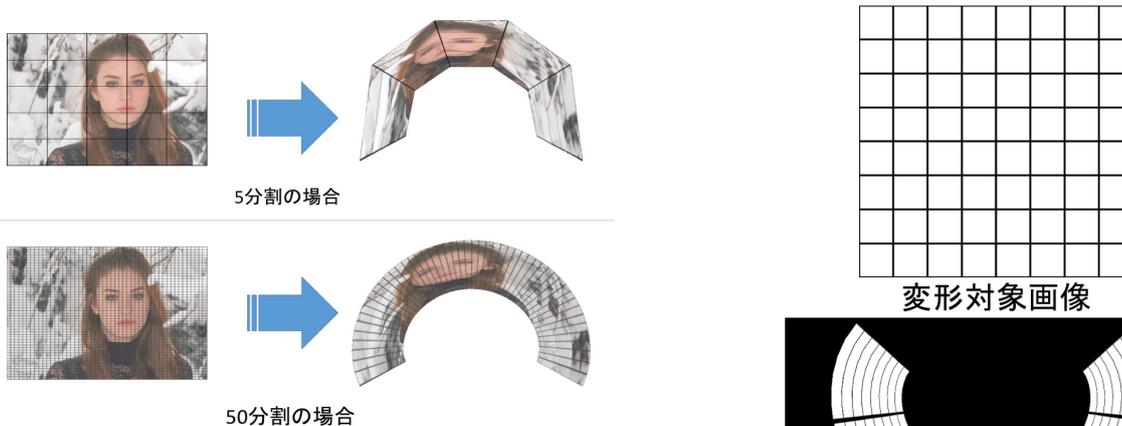


図 9 グリッド分割とテクスチャマッピングによる画像変形。

である。50, 100, 150, 200, 250 の分割数に対して測定を行なった。この結果、変換しない場合が 60fps 程度であったのに対して、変換した場合は、分割数にはあまり影響なく 50fps 程度であった。変換処理のオーバーヘッドは少なく、テレビ会議の動画として十分な fps 値を実現することができた。変換を行なった場合、動画送受信開始直後 10 秒ほどの間、fps が 30~40fps に留まっていた。この理由は不明であるが、プログラムの実行に関して何らかの動的な最適化が実施されたものと推測している。起動直後の短期間の現象であるため、実際のテレビ会議利用に支障は少ないと考えている。

さらに、画像変形のためのグリッド生成処理時間に関しても測定を行なった。本システムでは、計算によるグリッドを生成後、グリッドに動画のテクスチャマッピングを開始し、表示を行う。そのため、グリッド計算に必要な時間が経過したのちに、映像を表示開始する。この遅延時間を測定するために、それぞれの分割数によるシステムを 5 回計測し平均を記録した。結果は、50 分割では 0.13 秒、100 分割では 0.47 秒、150 分割では 1.50 秒であった。100 分割以下であれば、起動のための遅延をほとんど気にすることなく利用可能であると思われる。

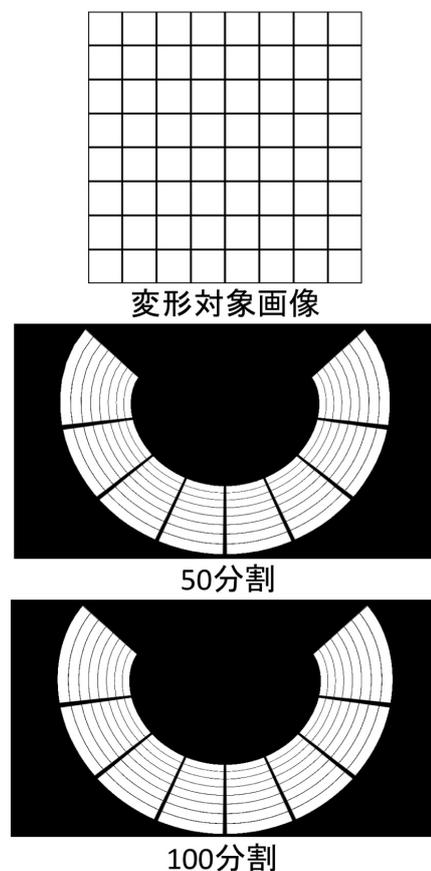


図 10 格子画像（上）を 50 分割（中）、100 分割（下）し変換した結果。

## 6. まとめと今後の展望

本研究では、タッチディスプレイ上に置いた鏡面円筒に映像を表示するタンジブルなデバイスである Anamorphicon を使用したテレビ会議システムを開発した。本システムは、遠隔対話者が表示された Anamorphicon を手で回転・移動させることで、相手の表示を回転させ、さらに相手の視線方向を変えることができる。これにより遠隔参加者の存在感を感じさせるテレビ会議システムを安価に構築可能

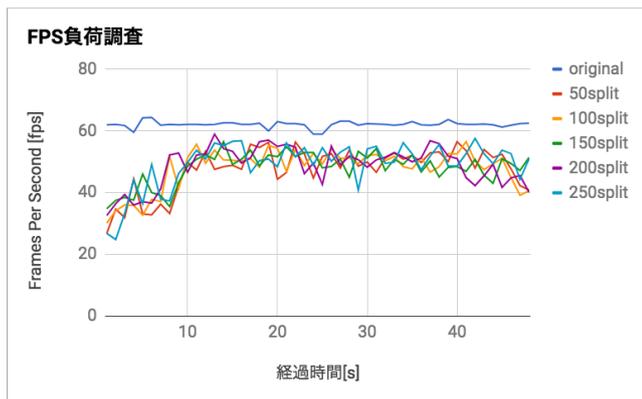


図 11 FPS 計測値.

である。さらに、実時間で動作するテレビ会議のために、画像変換を高速に実現する手法を導入した。またユーザーの全周囲画像を取得するために、遠隔地の Anamorphicon の回転に同期してユーザーの周囲を回転するカメラを開発した。さらに実装したテレビ会議システムの性能を測定し、テレビ会議のための動画送受信に適した処理性能が得られたことを確認した。今後は、実際のテレビ会議に活用し、ユーザビリティを調査する予定である。また、現在では 1 対 1 でのテレビ会議通信のみ実装しているが、今後は複数人数での対応を実現したい。

**謝辞** 本研究は JSPS 科研費 JP26330219 の助成を受けたものである。

### 参考文献

[1] Billinghurst, M., Bowskill, J., Jessop, M. and Morphet, J.: A wearable spatial conferencing space, *Digest of Papers. Second International Symposium on Wearable Computers (Cat. No.98EX215)*, pp. 76–83 (online), DOI: 10.1109/ISWC.1998.729532 (1998).

[2] Goodwin, C.: Professional Vision, *American Anthropologist*, Vol. 96, No. 3, pp. 606–633 (1994).

[3] Heath, C. and Luff, P.: Disembodied Conduct: Communication Through Video in a Multi-media Office Environment, *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI '91*, New York, NY, USA, ACM, pp. 99–103 (1991).

[4] Higuchi, K., Yonetani, R. and Sato, Y.: Can Eye Help You?: Effects of Visualizing Eye Fixations on Remote Collaboration Scenarios for Physical Tasks, *Proceedings of the 2016 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI '16*, New York, NY, USA, ACM, pp. 5180–5190 (online), DOI: 10.1145/2858036.2858438 (2016).

[5] Honda, K., Fukui, K., Shigeno, H. and Okada, K.: e-MulCS: multi-party conference system with virtual space and the intuitive input interface, *2004 International Symposium on Applications and the Internet. Proceedings.*, pp. 56–63 (online), DOI: 10.1109/SAINT.2004.1266099 (2004).

[6] Ikematsu, K., Sasagawa, M. and Siio, I.: 2.5 Dimensional Panoramic Viewing Technique Utilizing a Cylindrical Mirror Widget, *Proceedings of the 29th Annual Symposium on User Interface Software and Technol-*

*ogy, UIST '16 Adjunct*, New York, NY, USA, ACM, pp. 145–146 (online), DOI: 10.1145/2984751.2985737 (2016).

[7] KENDON, A.: Some functions of gaze-direction in social interaction, *Acta Psychologica*, Vol. 26, pp. 22–63 (online), DOI: 10.1016/0001-6918(67)90005-4 (1967).

[8] KOBAYASHI, M. and Ishii, H.: ClearBoard : A Novel Shared Drawing Medium that Supports Gaze Awareness in Remote Collaboration, *Trans. IEICE*, Vol. 76, No. 6, pp. 609–617 (online), available from (<http://ci.nii.ac.jp/naid/110003216975/>) (1993).

[9] Misawa, K., Ishiguro, Y. and Rekimoto, J.: LiveMask: A Telepresence Surrogate System with a Face-shaped Screen for Supporting Nonverbal Communication, *Information and Media Technologies*, pp. 617–625 (2013).

[10] Otsuki, M., Kawano, T., Maruyama, K., Kuzuoka, H. and Suzuki, Y.: ThirdEye: Simple Add-on Display to Represent Remote Participant's Gaze Direction in Video Communication, *Proceedings of the 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI '17*, New York, NY, USA, ACM, pp. 5307–5312 (online), DOI: 10.1145/3025453.3025681 (2017).

[11] S., P. H., L., S. H. and N., B. M. K.: Image Scaling Comparison Using Universal Image Quality Index, *2009 International Conference on Advances in Computing, Control, and Telecommunication Technologies*, pp. 859–863 (online), DOI: 10.1109/ACT.2009.218 (2009).

[12] Sellen, A. J.: Speech Patterns in Video-mediated Conversations, *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI '92*, New York, NY, USA, ACM, pp. 49–59 (online), DOI: 10.1145/142750.142756 (1992).

[13] Spickler, D. and Bergner, J.: Cylinder Reflections: The Mathematics behind the Images (2012).

[14] Suga, C. and Siio, I.: Anamorphicons: An Extended Display with a Cylindrical Mirror, *Proceedings of the ACM International Conference on Interactive Tabletops and Surfaces, ITS '11*, New York, NY, USA, ACM, pp. 242–243 (online), DOI: 10.1145/2076354.2076396 (2011).

[15] 中西英之, 西村俊和, 石田 亨: デスクトップ会議における 3 次元仮想空間の効果, *情報処理学会論文誌*, Vol. 39, No. 10, pp. 2770–2777 (オンライン), 入手先 (<http://ci.nii.ac.jp/naid/110002722314/>) (1998).

[16] 岡田謙一, 松下 温: 臨場感のある多地点テレビ会議システム: MAJIC, *情報処理学会論文誌*, Vol. 36, No. 3, pp. 775–783 (オンライン), 入手先 (<http://ci.nii.ac.jp/naid/110002721828/>) (1995).

[17] 菅原昌平, 松浦宣彦, 箕浦大祐, 松本敏宏, 正木茂樹: 高精細型インタースペースによる会話環境の検討, *情報処理学会研究報告グループウェアとネットワークサービス (GN)*, Vol. 1999, No. 7, pp. 67–72 (オンライン), 入手先 (<http://ci.nii.ac.jp/naid/170000037803/>) (1999).

[18] 山口 創, 鈴木晶夫: 座席配置が気分及ぼす効果に関する実験的研究, *実験社会心理学研究*, Vol. 36, No. 2, pp. 219–229 (オンライン), DOI: 10.2130/jjesp.36.219 (1996).