

[非公開]

TR-C-0024

奥行き歪に関する一検討

秋山 建二  
KENJI AKIYAMA

小林 幸雄  
YUKIO KOBAYASHI

1989. 1. 30

ATR通信システム研究所

## 奥行き歪に関する一検討

平成元年01月30日

秋山 健二

小林 幸雄

### 1. まえがき

近年の技術の進歩にともない「そこに存在するが如く、聞き、見、触れたい」という様な臨場性のある通信への要求が高まってきている<sup>[1]、[2]、[3]</sup>。私たちは、この様な「あたかも自分がその空間に存在する様な環境を人々に提供することができる臨場性のある通信」を臨場感通信と呼んでいる。臨場感通信システムの実現は、情報通信全般に大きなインパクトを与え、人々の社会生活をさらに豊かなもの、より良いものにするものと思われる。

臨場感通信のサービスイメージとしては、会議サービス、（会議のアプリケーションとして）イメージクリエータ、模擬体験サービス等が考えられる（付録Aに臨場感通信のサービスイメージの詳細を示す。）。臨場感通信システムを実現するには、空間を違和感なしに再現する技術を開発する必要がある。すなわち、このような臨場感通信サービスを実現するためには、

- ・ 観察者の立場で、見たい所から自由に見れる受けて主体の表示、
- ・ 実空間と表示空間との連続性が得られる表示、
- ・ 奥行き歪のない表示、

等の特徴を有する表示技術の開発が望まれる。

特に、会議サービスにおいては、

- ・ 相手の視線の方向が分かる表示、
- ・ 視線の一致が出来る表示、

等の特徴を有する表示技術も要求される。

本稿では、臨場感通信システムを実現するための要素技術である表示技術について、表示方法と奥行き歪に関する検討結果について述べる。

## 2. 立体表示方法

臨場感通信に関する立体表示の主観評価実験から、効果的な臨場感を得るためには

(1) 表示画像と実空間の連続性、

(2) 受けて主体の表示 (視線方向の画像を表示すること)、

等が重要であることが分かった (付録Bに臨場感通信に関する主観評価実験の詳細を示す。 )。

以下、各種立体表示方法に関して述べる。

### 2. 1 各種立体表示方法

各種立体表示方法を表2. 1に示す。以下、各種立体表示方法に関して、各々の表示方法の概要、各々の表示方法の特徴、等について述べる。

#### (1) スクリーン投影形<sup>[4]</sup>

スクリーン投影形は、大型スクリーンに偏光あるいは時分割フィルタを用いて両眼視差を有する左右2枚の画像を同時に投影する方法であり、以下に示す特徴を有する。

- ・広視野化するためには、表示スクリーンを非常に大きくする必要があり難しい。
- ・画像は、固定した表示スクリーン内にしか表示できないため、スクリーン外に対応する画像を観察することはできない。
- ・表示スクリーンと実空間は、スクリーンの縁部分で分離されるため不連続となる。
- ・複数人が同時に同一のスクリーンに投影された画像を観察できるが、見る位置が異なると奥行き歪 (画像歪も含む) も異なる。
- ・偏光あるいは時分割フィルタ (メガネ) が必要である。

#### (2) レンティキュラスクリーン<sup>[5]</sup>

レンティキュラスクリーン方式は、複数方向から撮影した画像をレンティキュラスクリーンに同時に投影する方法であり、以下に示す特徴を有する。

- ・大型のレンティキュラスクリーンを作成することは難しく、広視野化はスクリーン投影形 (1) 以上に難しい。
- ・スクリーン投影形と同様に固定した表示スクリーン内にしか画像を表示できないため、スクリーン外に対応する画像を観察することはできない。
- ・表示スクリーンと実空間は、スクリーンの縁部分で分離されるため不連続となる。
- ・複数人が同時に同一のスクリーンに投影された画像を観察できる。
- ・あらかじめ見る位置に応じた画像を複数撮影して、スクリーンに投影しているので見える位置によって奥行き歪 (画像歪も含む) が変わることはない。しかし、見る位置を変えると画像がスキップするという問題がある。
- ・偏光あるいは時分割フィルタ (メガネ) は不要である。

#### (3) 全体視スクリーン (ドーム形)

全体視スクリーン方式は、ドーム形の大型スクリーンに偏光あるいは時分割フィルタを用いて両眼視差を有する左右2枚の画像を同時に投影する方法であり、以下に示す特徴を有する。

- ・視線を動かすことにより視線を向けた方向の画像を自然に観察できる。
- ・全体視スクリーンであっても床下、床下に近い壁等をスクリーンとすることはできず、表示スクリーンと実空間は、スクリーンの縁部分で分離されるため不連続となる。
- ・スクリーン投影形と同様に複数人が同時に同一のスクリーンに投影された画像を観察できるが、見る位置が異なると奥行き歪（画像歪も含む）も異なる。
- ・偏光あるいは時分割フィルタ（メガネ）が必要である。

#### （４）ヘッド・マウンテッド・ディスプレイ<sup>[6]</sup>

ヘッド・マウンテッド・ディスプレイ方式は、両眼をディスプレイでスッポリと覆う構成であり、以下に示す特徴を有する。

- ・広視野化するためには、高分解能のディスプレイが必要である。
- ・視線を動かすことにより視線を向けた方向の画像を自然に観察できる。
- ・移動することもでき模擬体験用のディスプレイとして適している。
- ・実空間は見えないため表示スクリーンと実空間との不連続は生じない。しかし、逆に、実空間が見えないというデメリットもある。
- ・画像歪は見る位置によって影響されない。
- ・違和感の少ないヘルメットを開発する必要がある。

#### （５）ホログラフィ<sup>[7]</sup>

コヒーレント光を物体に照射し、この散乱光を写真乾板に焼付け、この写真乾板に再生光を照射し立体画像を再生する方法であり、以下に示す特徴を有する。

- ・あたかもその場所にもものがあるが如く見ることができる。
- ・広視野化、リアルタイム性、伝送方式等に関しては問題が多々ある。

### 3. 奥行き歪

本章では、撮影・投影条件と奥行き歪との関係に関する検討結果について述べる。なお、奥行き歪は、検討の第1ステップとして最も簡単なスクリーン投影形表示方法に関して検討した。以下、奥行き歪の検討結果について述べる。

#### 3. 1 撮影・投影系のモデル

撮影・投影系のモデルを図3. 1に示す。図3. 1 (a)に示すように四辺形A B C Dで囲まれる空間を $S_R$ 点及び $S_L$ 点にそれぞれ設置した2台のカメラで撮影し、撮影した2眼式立体画像を図3. 1 (b)に示すように $P_R$ 点及び $P_L$ 点にそれぞれ設置した2台のビデオプロジェクタを用いてスクリーンに投影する。このようなスクリーン投影形立体表示システムにおいて、以下に示す各種パラメータと奥行き歪の関係を求めた。なを、奥行き歪は、四辺形A B C Dで囲まれた空間がどのように歪むかを図示することにより示した。したがって、奥行き歪がどのように生じるかを簡単にイメージとして知ることができる。

各種パラメータ：

- 1) 表示倍率、2) 視距離、3) 両眼の間隔  $L_U$ 、4) 撮影カメラの間隔  $L_C$ 、
- 5) 投影プロジェクタの間隔  $L_P$ 、6) カメラ光軸及びプロジェクタ光軸の収斂角、
- 7) 観察位置

なを、図3. 2から図3. 28において、

- $S_L$ ：左側カメラの撮影位置、
- $S_R$ ：右側カメラの撮影位置、
- $P_L$ ：左側プロジェクタの投影位置、
- $P_R$ ：右側プロジェクタの投影位置、
- $V_L$ ：左目の位置、
- $V_R$ ：右目の位置、

である。

### 3. 2 表示倍率と奥行き歪

表示倍率を  $n$  倍とした場合の奥行き歪の様子を図3. 2、図3. 3に示す。なお、撮影カメラの間隔  $L_C$  及び投影プロジェクタの間隔  $L_P$  は両眼の間隔  $L_U$  と同じ間隔とした。また、左側カメラの撮影位置  $S_L$ 、左側プロジェクタの投影位置  $P_L$  及び左目の位置  $V_L$  は同一の位置とした。同様に、右側カメラの撮影位置  $S_R$ 、右側プロジェクタの投影位置  $P_R$  及び右目の位置  $V_R$  も同一の位置とした。なお、左右のカメラの光軸は物体に対して垂直とし、左右のプロジェクタの光軸はスクリーンに対して垂直とした。また、スクリーンの位置は、四辺形の一辺  $AB$  上とした。

まず、図3. 2について簡単に説明する。図3. 2 (a) は、四辺形  $ABCD$  で囲まれた空間を  $S_L$  点及び  $S_R$  点に設置した2台のカメラで撮影し、撮影した2枚の画像を  $P_L$  点及び  $P_R$  点に設置したプロジェクタによりスクリーンに投影し、投影した画像を観察点  $V_L$  点及び  $V_R$  点から観察した場合に四辺形  $ABCD$  で囲まれた空間がどのように観察されるかを示したものである。この場合、撮影された四辺形の頂点  $ABCD$  は、スクリーン上で以下の点に投影される。

頂点	左画像	右画像
A	$A_L$	$A_R$
B	$B_L$	$B_R$
C	$C_L$	$C_R$
D	$D_L$	$D_R$

この立体画像を  $V_L V_R$  点から観察すると、四辺形  $ABCD$  の頂点はそれぞれ、

線分  $\overline{V_L A_L}$  と線分  $\overline{V_R A_R}$  の交点、

線分  $\overline{V_L B_L}$  と線分  $\overline{V_R B_R}$  の交点、

線分  $\overline{V_L C_L}$  と線分  $\overline{V_R C_R}$  の交点、

線分  $\overline{V_L D_L}$  と線分  $\overline{V_R D_R}$  の交点

というように左画像と右画像の交点の位置に存在するように観察される。これより、図 3. 2 (a) の場合には、全く歪の無い空間を観察することができることが分かる。

図 3. 2 (b) に示すように表示倍率を  $n$  倍とした場合には、四辺形の頂点  $ABCD$  はそれぞれ、以下のような位置に表示される。

左画像では、

$$\overline{A_L' B_L} = n \overline{A_L B_L}$$

$$\overline{B_L D_L'} = n \overline{B_L D_L}$$

となる位置に表示される。

右画像では、

$$\overline{A_R B_R'} = n \overline{A_R B_R}$$

$$\overline{A_R C_R'} = n \overline{A_R C_R}$$

となる位置に表示される。

この立体画像を  $V_L V_R$  点から観察すると、前節で述べたように四辺形の頂点は左画像と右画像の交点に存在するように観察される。したがって、表示倍率を  $n$  倍とした場合には、四辺形  $ABCD$  で囲まれた空間は四辺形  $A' B' C' D'$  で囲まれた空間に歪んで観察されることが分かる。また、図 3. 3 (a) に示すような図形は、図 3. 3 (b) に示すように歪んで観察されることが分かる。

次に、奥行き歪  $D_D$  がどの程度になるかを解析した結果を以下に示す。

まず、立体視により物体がどの位置で観察できるかについて解析する。

図 3. 2 (b) において

$$\triangle P_L B' A' \text{ の } \triangle P_L B_L A_L'$$

であるから

$$\overline{B_L A_R} : \overline{B_L A_L'} = \overline{B' P_L} : \overline{B_L P_L} \quad (2-1)$$

である。ここで、

$$\overline{B_L A_R} : \overline{B_L A_L'} = 1 : n \quad (2-2)$$

であるから、式 (2-1) は、

$$\overline{B' P_L} : \overline{B_L P_L} = 1 : n \quad (2-3)$$

となる。これより、

$$\overline{B' P_L} = \overline{B_L P_L} / n \quad (2-4)$$

となる。

これより、観察対象物体は、表示倍率を  $n$  倍とすれば見かけ上  $1/n$  の距離に存在するように観察されることが分かる。したがって、見かけ上観察対象物体を  $1/n$  の視距離から観察したことと同様となり、物体の見かけ上の大きさは  $n$  倍となる。

次に、表示倍率を  $n$  倍とした場合の奥行き歪率  $D_D$  について考える。

図 3. 2 (b) において

$$D_D = B'C' / BC$$

である。ここで、

$$\triangle P_R C_R' B_R' \text{ の } \triangle P_R C' B'$$

であるから、

$$\overline{A_R B_R'} : \overline{A_R B_L} = \overline{B_R' C_R'} : \overline{B' C'} \quad (2-5)$$

である。ここで、

$$\overline{A_R B_R'} : \overline{A_R B_L} = n : 1 \quad (2-6)$$

であるから、式 (2-5) は、

$$\overline{B_R' C_R'} : \overline{B' C'} = n : 1 \quad (2-7)$$

となる。これより

$$\overline{B' C'} = \overline{B_R' C_R'} / n = \overline{BC} / n \quad (2-8)$$

となる。

したがって、奥行き歪  $D_D$  は、

$$D_D = 1 / n$$

となる。

したがって、奥行き歪率  $D_D$  は倍率を  $n$  倍とすれば  $1/n$  となることが分かる。

### 3. 3 視距離と奥行き歪

視距離と奥行き歪との関係を図 3. 4、図 3. 5 に示す。

図 3. 4 は視距離を  $1/n$  とした場合の奥行き歪の様子を、図 3. 5 は視距離を  $n$  倍とした場合の奥行き歪の様子をそれぞれ示す。なを、図 3. 4、図 3. 5 において撮影カメラの間隔  $L_C$  及び投影プロジェクタの間隔  $L_P$  は両眼の間隔  $L_U$  と同じ間隔とした。これより、視距離が  $1/n$  となることは倍率が  $n$  倍となったことと同じであることが分かる。逆に、視距離が  $n$  倍となることは倍率が  $1/n$  となったことと同じであることが分かる。したがって、奥行き歪率  $D_D$  は前 3. 2 節と同様になる。

### 3. 4 表示倍率、視距離と奥行き歪

表示倍率と奥行き歪との関係並びに視距離と奥行き歪との関係については、それぞれ前 3. 2 節及び 3. 3 節において検討した。本節では、これらの関係を整理し、まとめた。

表示倍率と奥行き歪との関係を図 3. 6 及び図 3. 7 に示す。なを、図 3. 6、図 3. 7 において両眼の間隔  $L_U$ 、撮影カメラの間隔  $L_C$  及び投影プロジェクタの間隔  $L_P$  は同じ間隔とした。

以下、図 3. 6 について簡単に述べる。

- ・物体  $BC$  を  $S_L S_R$  点から撮影し、この 2 眼式立体画像を  $P_L P_R$  点からスクリーン上に投影する。
- ・左画像において、物体  $BC$  は  $B_L C_L$  として同一点に重なって表示される。
- ・右画像において、物体  $BC$  は  $B_{R1} C_{R1}$  として表示される。
- ・投影時の倍率を  $n$  倍とすると、物体  $BC$  は左画像においては変化せずそのまま  $B_L C$

$L$ として表示される。

- 一方、物体BCは、右画像においては $B_{R2}C_{R2}$ として拡大されて表示される。
- $V_L V_R$ 点からこの画像を観察すると立体画像として物体 $B'C'$ が観察できる。
- 次に、視距離を $n$ 倍とし $V_L' V_R'$ 点からこの画像を観察すると立体画像として物体 $B''C''$ が観察できる。

次に、図3. 7について簡単に述べる。

- 物体BCを $S_L S_R$ 点から撮影し、この2眼式立体画像を $P_L P_R$ 点からスクリーン上に投影する。
- 左画像において、物体BCは $B_L C_L$ として同一点に重なって表示される。
- 右画像において、物体BCは $B_{R1} C_{R1}$ として表示される。
- 投影時の倍率を $1/n$ 倍とすると、物体BCは左画像においては変化せずそのまま $B_L C_L$ として表示される。
- 一方、物体BCは、右画像においては $B_{R2} C_{R2}$ として縮小されて表示される。
- $V_L V_R$ 点からこの画像を観察すると立体画像として物体 $B'C'$ が観察できる。
- 次に、視距離を $1/n$ 倍とし $V_L' V_R'$ 点からこの画像を観察すると立体画像として物体 $B''C''$ が観察できる。

図3. 6、図3. 7から以下のことが言える。

- 1) 表示倍率と視距離とを調整することにより、立体画像の奥行き歪を補正することは可能である。
- 2) 1)の場合、立体画像の観察できる位置は元の位置と異なる。したがって、表示された立体画像と自分の回りの環境との連続性が損なわれる。
- 3) 臨場性を保つためには、自分の回りの環境と表示された画像との連続性が必要であり、撮影、投影で1対1の関係が必要である。

### 3. 5 カメラ間隔 $L_C$ 、プロジェクタ間隔 $L_P$ と奥行き歪

両眼の間隔 $L_U$ に対して、カメラ間隔 $L_C$ 、プロジェクタ間隔 $L_P$ 等のパラメータを以下の各項に示すように設定した場合の奥行き歪について以下に述べる。なお、左右のカメラの光軸は物体に対して垂直とし、左右のプロジェクタの光軸はスクリーンに対して垂直とした。また、スクリーンの位置は、四辺形の一辺 $AB$ 上とした。

(1) 両眼の間隔 $L_U =$ プロジェクタ間隔 $L_P >$ カメラ間隔 $L_C$

プロジェクタ間隔 $L_P$ を両眼の間隔 $L_U$ と同じ間隔とし、この間隔よりもカメラ間隔 $L_C$ を小さくした場合の奥行き歪の様子を図3. 8、図3. 9に示す。

図3. 8、図3. 9は、四辺形 $ABCD$ を $S_L S_R$ 点から撮影し、撮影した画像を $P_L P_R$ 点からスクリーンに投影し、投影した画像を $V_L V_R$ 点から観察した場合に四辺形で囲まれた空間がどのように観察されるかを示したものである。

図3. 8は、右側画像を撮影するためのカメラの位置だけをずらしてカメラ間隔 $L_C$ を両眼の間隔 $L_U$ に比べて狭くして撮影し、この画像をスクリーンに投影した場合の奥行き歪の様子を示す。これに対して図3. 9は、左右両方のカメラの位置をずらしてカメラ



間隔  $L_C$  を両眼の間隔  $L_U$  に比べて狭くして撮影し、この画像をスクリーンに投影した場合の奥行き歪の様子を示す。

以下、奥行き歪について解析する。

図3. 8、図3. 9から奥行き歪率  $D_D$  は以下ようになる。

$$D_D = \overline{P_L B'} / \overline{S_L B} \quad (5-1)$$

ここで、

$$\triangle S_R S_L B \text{ の } \triangle P_R P_L B' \quad (5-2)$$

であるから、

$$\overline{S_L B} : \overline{P_L B'} = \overline{S_L S_R} : \overline{P_L P_R} \quad (5-3)$$

となる。これより、

$$\overline{P_L B'} = (\overline{P_L P_R} \cdot \overline{S_L B}) / \overline{S_L S_R} \quad (5-4)$$

となる。

したがって、奥行き歪率  $D_D$  は、式 (5-4) を式 (5-1) に代入することにより求められる。

$$D_D = \overline{P_L P_R} / \overline{S_L S_R} \quad (5-5)$$

次に、水平方向の歪率  $D_H$  について考える。

図3. 8、図3. 9から水平方向の歪  $D_H$  は以下ようになる。

$$D_H = \overline{A' B'} / \overline{A B} \quad (5-6)$$

図3. 8、図3. 9から

$$\triangle S_L A B \text{ の } \triangle P_L A' B'$$

であから、

$$\overline{S_L B} : \overline{P_L B'} = \overline{A B} : \overline{A' B'} \quad (5-7)$$

である。これより

$$\overline{A' B'} = (\overline{A B} \cdot \overline{P_L B'}) / \overline{S_L B} \quad (5-8)$$

となる。ここで、

$$\triangle S_L S_R B \text{ の } \triangle P_L P_R B'$$

であることから、

$$\overline{S_L S_R} : \overline{P_L P_R} = \overline{S_L B} : \overline{P_L B'} \quad (5-9)$$

である。これより  $\overline{P_L B'}$  は、

$$\overline{P_L B'} = (\overline{S_L B} \cdot \overline{P_L P_R}) / \overline{S_L S_R} \quad (5-10)$$

となる。式 (5-10) を式 (5-8) に代入すると

$$\overline{A' B'} = \overline{A B} \cdot (\overline{P_L P_R} / \overline{S_L S_R}) \quad (5-11)$$

となる。

したがって、水平方向の歪率  $D_H$  は、

$$D_H = \overline{P_L P_R} / \overline{S_L S_R} \quad (5-12)$$

となる。

(2) 両眼の間隔  $L_U =$  プロジェクタ間隔  $L_P <$  カメラ間隔  $L_C$

プロジェクタ間隔  $L_P$  を両眼の間隔  $L_U$  と同じ間隔とし、この間隔よりもカメラ間隔  $L_C$

$l_c$ を広くした場合の奥行き歪の様子を図3. 10、図3. 11に示す。

図3. 10は右側画像を撮影するためのカメラの位置だけをずらして撮影時のカメラ間隔を両眼の間隔に比べて広くした場合の奥行き歪の様子を、図3. 11は左右の画像を撮影するためのカメラの位置をずらして撮影時のカメラ間隔を両眼の間隔に比べて広くした場合の奥行き歪の様子を各々示す。

図3. 10、図3. 11から奥行き歪率 $D_D$ は以下のようになる。

$$D_D = \overline{P_L B'} / \overline{S_L B} \quad (5-13)$$

ここで、

$$\triangle S_R S_L B \text{ の } \triangle P_R P_L B'$$

であるから、

$$\overline{S_L B} : \overline{P_L B'} = \overline{S_L S_R} : \overline{P_L P_R} \quad (5-14)$$

である。これより

$$\overline{P_L B'} = (\overline{S_L B} \cdot \overline{P_L P_R}) / \overline{S_L S_R} \quad (5-15)$$

となる。奥行き歪率 $D_D$ は、式(5-15)を式(5-13)へ代入することにより求められる。したがって、

$$D_D = \overline{P_L P_R} / \overline{S_L S_R} \quad (5-16)$$

となる。

次に、水平方向の歪 $D_H$ について考える。

水平方向の歪 $D_H$ は以下のようになる。

$$D_H = \overline{A' B'} / \overline{A B} \quad (5-17)$$

ここで、

$$\triangle S_L A B \text{ の } \triangle P_L A' B'$$

であるから、

$$\overline{A B} : \overline{A' B'} = \overline{S_L B} : \overline{P_L B'} \quad (5-18)$$

である。これより

$$\overline{A' B'} = (\overline{A B} \cdot \overline{P_L B'}) / \overline{S_L B} \quad (5-19)$$

となる。ここで、

$$\triangle S_L S_R B \text{ の } \triangle P_L P_R B' \quad (5-20)$$

であることから、

$$\overline{S_L B} : \overline{P_L B'} = \overline{S_L S_R} : \overline{P_L P_R} \quad (5-21)$$

である。これより $\overline{P_L B'}$ は、

$$\overline{P_L B'} = (\overline{S_L B} \cdot \overline{P_L P_R}) / \overline{S_L S_R} \quad (5-22)$$

となり、式(5-22)を式(5-19)に代入すると

$$\overline{A' B'} = \overline{A B} \cdot (\overline{P_L P_R} / \overline{S_L S_R}) \quad (5-23)$$

となる。

したがって、水平方向の歪率 $D_H$ は、

$$D_H = \overline{P_L P_R} / \overline{S_L S_R} \quad (5-24)$$

となる。

奥行き歪率 $D_D$ は、式(5-5)及び式(5-16)よりカメラ間隔 $l_c$ に反比例する

ことが分かる。また、水平方向の歪率 $D_H$ は、式(5-12)及び式(5-24)よりカメラ間隔 $L_c$ に反比例することが分かる。しかし、水平方向の物体の見かけの大きさは変化しない。

注

以降の奥行き歪の解析は、上記(1)、(2)のように各々の項目毎に解くことよりも、撮影系と投影系をモデル化して奥行き歪を解析<sup>[8]</sup>の方が簡単である。したがって、ここでは単に奥行き歪がどのようになるのか図示することにとどめる。図示することにより奥行き歪がどのように生じるのか、奥行き歪を補正するにはどうしたら良いか等を簡単に知ることができる。なを、付録Bに撮影系と投影系をモデル化して奥行き歪を解析した結果を示すこととする。

(3) 両眼の間隔 $L_u = \text{カメラ間隔 } L_c < \text{プロジェクタ間隔 } L_p$

カメラ間隔 $L_c$ を両眼の間隔 $L_u$ と同じ間隔とし、この間隔よりもプロジェクタ間隔 $L_p$ を広くした場合の奥行き歪の様子を図3.12、図3.13に示す。図3.12は、右側画像を投影するためのプロジェクタの位置だけをずらしてプロジェクタ間隔を両眼の間隔に比べて広くした場合の奥行き歪の様子を示す。図3.13は、左右の画像を投影するためのプロジェクタの位置をずらしてプロジェクタ間隔を両眼の間隔に比べて広くした場合の奥行き歪の様子を示す。

これより、物体の奥行きは実際の奥行きよりも拡大して観察されることが分かる。一方、水平方向の物体の見かけの大きさは変化しない。

(4) 両眼の間隔 $L_u = \text{カメラ間隔 } L_c > \text{プロジェクタ間隔 } L_p$

カメラ間隔 $L_c$ を両眼の間隔 $L_u$ と同じ間隔とし、この間隔よりもプロジェクタ間隔 $L_p$ を狭くした場合の奥行き歪の様子を図3.14、図3.15に示す。

図3.14は、右側画像を投影するためのプロジェクタの位置だけをずらしてプロジェクタ間隔を両眼の間隔に比べて狭くした場合の奥行き歪の様子を示す。図3.15は、左右の画像を投影するためのプロジェクタの位置をずらしてプロジェクタ間隔を両眼の間隔に比べて狭くした場合の奥行き歪の様子を示す。

これより、物体の奥行きは実際の奥行きよりも縮小して観察されることが分かる。一方、水平方向の物体の見かけの大きさは変化しない。

(5) カメラ間隔 $L_c = \text{プロジェクタ間隔 } L_p < \text{両眼の間隔 } L_u$

カメラ間隔 $L_c$ とプロジェクタ間隔 $L_p$ とを同じ間隔とし、この間隔を両眼の間隔 $L_u$ よりも狭くした場合の奥行き歪の様子を図3.16、図3.17に示す。

図3.16は、右側画像を撮影するためのカメラの位置並びに投影するためのプロジェクタの位置をずらしてカメラ間隔及びプロジェクタ間隔を両眼の間隔に比べて狭くした場合の奥行き歪の様子を、図3.17は左右の画像を撮影するためのカメラの位置並びに投影するためのプロジェクタの位置をずらしてカメラ間隔及びプロジェクタ間隔を両眼の間隔に比べて狭くした場合の奥行き歪の様子を各々示す。

これより、物体の奥行きは実際の奥行きよりも縮小して観察されることが分かる。一方、水平方向の物体の見かけの大きさは変化しない。

(6) カメラ間隔  $L_c =$  プロジェクタ間隔  $L_p >$  両眼の間隔  $L_u$

カメラ間隔  $L_c$  とプロジェクタ間隔  $L_p$  とを同じ間隔とし、この間隔を両眼の間隔  $L_u$  よりも広くした場合の奥行き歪の様子を図3. 18、図3. 19に示す。

図3. 18は、右側画像を撮影するためのカメラの位置並びに投影するためのプロジェクタの位置をずらしてカメラ間隔及びプロジェクタ間隔を両眼の間隔に比べて広くした場合の奥行き歪の様子を示す。図3. 19は、左右の画像を撮影するためのカメラの位置並びに投影するためのプロジェクタの位置をずらしてカメラ間隔及びプロジェクタ間隔を両眼の間隔に比べて広くした場合の奥行き歪の様子を示す。

これより、物体の奥行きは実際の奥行きよりも拡大して観察されることが分かる。一方、水平方向の物体の見かけの大きさは変化しない。

(7) 両眼の間隔  $L_u <$  カメラ間隔  $L_c <$  プロジェクタ間隔  $L_p$

右側画像を撮影するためのカメラの位置並びに投影するためのプロジェクタの位置をずらして各々の間隔が、両眼の間隔  $L_u <$  カメラ間隔  $L_c <$  プロジェクタ間隔  $L_p$  となるように設定した場合の奥行き歪の様子を図3. 20に示す。

これより、物体の奥行きは実際の奥行きよりも拡大して観察されることが分かる。一方、水平方向の物体の見かけの大きさは変化しない。

(8) 両眼の間隔  $L_u <$  プロジェクタ間隔  $L_p <$  カメラ間隔  $L_c$

右側画像を撮影するためのカメラの位置並びに投影するためのプロジェクタの位置をずらして各々の間隔が、両眼の間隔  $L_u <$  プロジェクタ間隔  $L_p <$  カメラ間隔  $L_c$  となるように設定した場合の奥行き歪の様子を図3. 21に示す。

これより、物体の奥行きは実際の奥行きよりも拡大して観察されることが分かる。一方、水平方向の物体の見かけの大きさは変化しない。

(9) プロジェクタ間隔  $L_p <$  カメラ間隔  $L_c <$  両眼の間隔  $L_u$

右側画像を撮影するためのカメラの位置並びに投影するためのプロジェクタの位置をずらして各々の間隔が、プロジェクタ間隔  $L_p <$  カメラ間隔  $L_c <$  両眼の間隔  $L_u$  となるように設定した場合の奥行き歪の様子を図3. 22に示す。

これより、物体の奥行きは実際の奥行きよりも縮小して観察されることが分かる。一方、水平方向の物体の見かけの大きさは変化しない。

(10) カメラ間隔  $L_c <$  両眼の間隔  $L_u <$  プロジェクタ間隔  $L_p$

右側画像を撮影するためのカメラの位置並びに投影するためのプロジェクタの位置をずらして各々の間隔が、カメラ間隔  $L_c <$  両眼の間隔  $L_u <$  プロジェクタ間隔  $L_p$  となるように設定した場合の奥行き歪の様子を図3. 23に示す。

これより、物体の奥行きは実際の奥行きよりも拡大して観察されることが分かる。一方、水平方向の物体の見かけの大きさは変化しない。

### 3. 6 カメラ光軸、プロジェクタ光軸と奥行き歪

カメラ光軸、プロジェクタ光軸を以下各項で示すように設定した場合の奥行き歪の様子を以下に示す。なを、撮影カメラの間隔 $L_c$ 及び投影プロジェクタの間隔 $L_p$ は、両眼の間隔 $L_u$ と同じ間隔とした。また、左右画像の撮影点と投影点は同一とした。

#### (1) 投影時に収斂角をつける

2眼カメラの各々の光軸を平行とし、左右画像投影用プロジェクタの各々の光軸が内側を向くように設定した場合の奥行き歪の様子を図3. 24に示す。

これより、物体の奥行きは実際の奥行きよりも縮小して観察されることが分かる。一方、水平方向の物体の見かけの大きさは変化しない。

#### (2) 撮影時に収斂角をつける

2眼カメラの各々の光軸が内側を向くように設定し、左右画像投影用プロジェクタの各々の光軸を平行とした場合の奥行き歪の様子を図3. 25に示す。

これより、物体の奥行きは実際の奥行きよりも拡大して観察されることが分かる。一方、水平方向の物体の見かけの大きさは変化しない。

### 3. 7 観察点と奥行き歪

撮影点と投影点に対する観察点の位置と奥行き歪との関係を図3. 26、図3. 27、図3. 28に示す。なを、撮影カメラの間隔 $L_c$ 及び投影プロジェクタの間隔 $L_p$ は、両眼の間隔 $L_u$ と同じ間隔とした。また、左右画像の撮影点と投影点は同一とした。

#### (1) 観察点をスクリーンに対して平行に移動

観察点 $V_L V_R$ をスクリーンに対して平行に移動させた場合の奥行き歪の様子を図3. 26示す。

#### (2) 観察点をスクリーン中央を中心とする円弧上に移動

観察点 $V_L V_R$ をスクリーン中央を中心とする円弧上に移動させた場合の奥行き歪の様子を図3. 27示す。

#### (3) 観察点をスクリーンの両端をそれぞれ中心とする円弧上に移動

図3. 28は、観察点 $V_L V_R$ をスクリーンの両端をそれぞれ中心とする円弧上に移動（スクリーンの両端からの視距離が左右各々同じとなるように）させた場合の奥行き歪の様子を示す。

## 4. あとがき

本稿では、臨場感通信システムを実現するための要素技術である表示技術について、

各種表示方法を概括するとともに撮影条件並びに表示条件と奥行き歪との関係について検討した結果を述べた。

#### 謝辞

日頃ご指導頂く葉原耕平会長、山下紘一社長並びに御討論頂いた3次元画像通信グループの皆様に深く感謝いたします。

#### 参考文献

- [1] 秋山：「臨場感通信へのアプローチとしての3次元画像の研究について」ATRジャーナル、vol. 3、pp2-5(1988. 4)
- [2] 石橋、秋山、小林：「臨場感通信会議システムに関する一考察」ATRテクニカルレポート、TR-C-0012、pp10-12(1988. 2)
- [3] 小林：「通信におけるヒューマンインタラクション」AIとヒューマンインターフェースセミナー資料、関西情報センタ・情報処理学会関西支部共催、p5-1～p5-10(1989. 1)
- [4] 秋山、肥塚、小林：「3次元画像通信に関する一考察」TV学技術報告、vol. 11、No. 3、pp25-30(1987. 5)
- [5] R. Borner：「Progress in projection of parallax-panoramagrams onto wide-angle lenticular screens」Proc. SPIE、vol. 761、pp35-43(1987)
- [6] A. B. Chambers、D. C. Nagel：「Pilots of the Future:Human or Computer」Communications of the ACM、vol. 28、no. 11、pp. 1187-1199(1985. 11)
- [7] 大越：「三次元画像工学」産業図書(1972)
- [8] 安達、大和、宮原：「2眼視立体画像空間の歪に関する考察」画像工学研究会資料IE83-73、pp49-54(1983)

## 付録

### 付録 A

臨場感サービスのサービスイメージを付表1に示す。

### 付録 B

仮想会議を想定して行なった評価実験の結果を以下に示す。

#### 付1. 実験方法

図1に実験方法を示す。

##### 付1. 1 撮影側の条件

- (1) 左右のカメラの光軸を正確に平行に調節することは非常に難しいので、ここでは無限遠の位置にある物体（画像内で最も遠い距離にある物体）が画面内で重なるように収斂角を調整する。
- (2) カメラの高さ  $h$  を127cm（椅子に座った時の眼の高さ）とした。
- (3) 人間の両眼の間隔は平均的には6.5cmと言われている。そこで、左右のカメラの間隔を6.5cmとした。
- (4) 実際に会議をしている場合の相手の位置から見た時と同じように画面が見えるようにカメラレンズの  $f$  及びカメラ・被写体距離を以下のように設定した。

$$f = 14\text{mm}$$

$$\text{カメラ・被写体距離} = 340\text{cm}$$

##### 付1. 2 投影側の条件

- (1) スクリーンに投影した映像と実物との大きさを一致させる。
- (2) プロジェクタの高さ  $h$  を148cmとした。
- (3) スクリーン上の左右像間隔は、6.5cm（偏向メガネの間隔と同じ）とした。
- (4) プロジェクタレンズ  $f$  を140mmとした。
- (5) スクリーン・プロジェクタ間距離を830cm（スクリーンに近いーフミラーからスクリーンまで）とした。

#### 付2. 実験結果

##### 付2. 1 臨場性について

- (1) 3D表示は、2D表示に比べて大きな臨場感が得られる。
- (2) 表示側のテーブルの有無は臨場感に大きく影響する。

- (3) 正面投影のためスクリーン上に観察者の影ができ、臨場感が損なわれる。
- (4) 目の高さでカメラの高さ、プロジェクタの高さが異なるため円テーブルの変形が生じる。
- (5) TVカメラの解像度不足、左右カメラの色づれ等が生じた。
- (6) 大きな臨場感を得るには音声も必要である。

## 付2. 2 臨場感の評価

### (1) 臨場感の因子

臨場感の因子として考えられるものを以下に示す。

- ・実物感
- ・色彩が自然
- ・疲れにくい
- ・視野が広い
- ・相手の環境と自分の周りの環境との連続性がある
- ・視線の一致ができる
- ・相手の表情が分かる
- ・自分が見たいところが見える

## 付2. 3 実験装置の改善

### (1) 投影側は、背面投影とすべきである

背面投影とすればカメラの高さ、プロジェクタの高さ、目の高さを同じにできる。さらに、観察者の影の問題も解決できる利点がある。

### (2) 2眼カメラベンチの改善

収斂角、カメラ間隔等を精度良く合わせられない、ちょっとした振動で設定が変動する等の問題がある。

### (3) カメラ・ミクサー

カメラ間距離・収斂角を調節できるように、カメラの解像度・色づれをなくすため。また、2眼カメラの方向を正確に合わせるため。



## 付録 C

下記文献の要約及び式の導出を以下に示す。

安達、大和、宮原「2眼視立体画像空間の歪に関する考察」  
画像工学研究会資料IE83-73、pp49-54(1983)

### 付1 2眼式立体画像撮影・投影システムのモデル化

#### 付1.1 撮影系のモデル

付図2に撮影系のモデルを示す。左右2台のTVカメラのレンズ中心をそれぞれ $C_l$ 、 $C_r$ とし、線分 $\overline{C_l C_r}$ の中点を撮影系の原点 $O$ とする。なお、座標系は、奥行き方向を $z$ 軸とする直交座標系とする。ここで、以下の仮定をする。

(仮定1) 左右のTVカメラの光軸は、ともに $z$ 軸と平行である。

仮定1が成立する系を、 $y$ 軸方向から見ると付図3に示すようになる。付図3において、

$e$  : 左右のTVカメラの間隔

$d$  : レンズ中心から撮像面 ( $T_l$ 、 $T_r$ ) までの距離

である。

#### 付1.2 表示系のモデル

付図4に表示系のモデルを示す。左右両眼の中心をそれぞれ $E_l$ 、 $E_r$ とし、撮影系と同様に線分 $\overline{E_l E_r}$ の中点を表示系の原点 $O$ とする。座標系は、奥行き方向を $Z$ 軸とする直交座標系とする。今、左右のTVカメラの光軸上にある点が、それぞれ表示画面上の点 $S_l$ 、 $S_r$ として表示されるものとする。ここで、以下の仮定をする。

(仮定2)  $S_l$ 、 $S_r$ はともに $X$ 軸に平行な直線

$$Y = (Z - R) = 0$$

上にある。

仮定2が成立する系を $Y$ 軸方向から見ると付図5のようになる。ここで、付図5において

$E$  : 左右眼の瞳孔間隔

$W$  :  $S_l$ 、 $S_r$ の間隔

$D$  : 表示装置 (スクリーン) の偏り

$R$  : 表示装置までの視距離

とする。また、左右眼像の大きさに関しては、

$M$  : カメラの撮像面から表示面への拡大率

とする。

### 付2 立体画像空間の解析

#### 付2.1 立体像の位置

(1)  $P_l$ 、 $P_r$ の位置

付図2に示すような被写体上のある1点 $p(x_p, y_p, z_p)$ が、付図5に示すように表示系においてはスクリーン上の左画像 $P_l(X_{pl}, Y_{pl}, Z_{pl})$ および右画像 $P_r(X_{pr}, Y_{pr}, Z_{pr})$ として表示されるものとすれば、 $P_l$ 、 $P_r$ の位置は、以下のように求められる。

### 左画像の位置

まず、 $X_{pl}$ を求める。

付図5より、

$$X_{pl} = D - W/2 + L_l \quad (2-1)$$

となることが分かる。ここで、付図6に示すように撮像面上でのX軸方向の像の大きさを $\alpha_x$ とすれば、

$$L_l = M \alpha_x \quad (2-2)$$

である。式(2-2)を式(2-1)に代入すると、

$$X_{pl} = D - W/2 + M \alpha_x \quad (2-3)$$

となる。

一方、付図6より

$$\alpha_x : (x_p + e/2) = d : z_p$$

の関係があることが分かる。したがって、

$$\alpha_x = (x_p + e/2) d / z_p \quad (2-4)$$

となる。ここで、式(2-4)を式(2-3)に代入すると

$$X_{pl} = D - W/2 + M d \{ (x_p + e/2) / z_p \} \quad (2-5)$$

となる。

次に、 $Y_{pl}$ を求める。

付図7に示すようにY軸方向の像の大きさを $\alpha_y$ とすれば、

$$Y_{pl} = M \alpha_y \quad (2-6)$$

である。

一方、付図7より、

$$\alpha_y : y_p = d : z_p$$

の関係があることが分かる。したがって、

$$\alpha_y = d y_p / z_p \quad (2-7)$$

となる。ここで、式(2-7)を式(2-6)に代入すると、

$$Y_{pl} = M d y_p / z_p \quad (2-8)$$

となる。

次に、 $Z_{pl}$ を求める。

付図5より、

$$Z_{pl} = R \quad (2-9)$$

となる。

### 右画像の位置

まず、 $X_{pr}$ を求める。

付図5より、

$$X_{pr} = D + W/2 - L_r \quad (2-10)$$

となることが分かる。ここで、付図6に示すように撮像面上でのX軸方向の像の大きさを $\alpha_{x'}$ とすれば、

$$L_r = M \alpha_{x'} \quad (2-11)$$

となる。

一方、付図6より、

$$\alpha_{x'} : (e/2 - x_p) = d : z_p$$

の関係があることが分かる。したがって、

$$\alpha_{x'} = (e/2 - x_p) d / z_p \quad (2-12)$$

となる。ここで、式(2-12)を式(2-11)に代入すると、

$$L_r = M d (e/2 - x_p) / z_p \quad (2-13)$$

となる。式(2-13)を式(2-10)に代入することにより、

$$X_{pr} = M d (x_p - e/2) / z_p + D + W/2 \quad (2-14)$$

となる。

次に、 $Y_{pr}$ を求める。付図5より、

$$Y_{pr} = Y_{pl}$$

であるから、式(2-8)より、

$$Y_{pr} = M d y_p / z_p \quad (2-15)$$

となる。

次に、 $Z_{pr}$ を求める。付図5より、 $Z_{pr} = Z_{pl}$ であるから、式(2-9)より、

$$Z_{pr} = R \quad (2-16)$$

となる。

以上、立体画像の位置をまとめて再掲すると以下のとおりとなる。

#### 左画像の位置

$$X_{pl} = D - W/2 + M d \{ (x_p + e/2) / z_p \} \quad (2-5)$$

$$Y_{pl} = M d y_p / z_p \quad (2-8)$$

$$Z_{pl} = R \quad (2-9)$$

#### 右画像の位置

$$X_{pr} = M d (x_p - e/2) / z_p + D + W/2 \quad (2-14)$$

$$Y_{pr} = M d y_p / z_p \quad (2-15)$$

$$Z_{pr} = R \quad (2-16)$$

#### (2) 直線 $\overline{E_l P_l}$ 及び $\overline{E_r P_r}$

pの立体画像 $P(X_p, Y_p, Z_p)$ は、付図4に示すように、 $E_l$ から $P_l$ に向かう半直線と $E_r$ から $P_r$ に向かう半直線の交点として求められる。そこで、まず直線 $\overline{E_l P_l}$ 及び直線 $\overline{E_r P_r}$ を求める。

#### 直線 $\overline{E_l P_l}$

直線 $\overline{E_l P_l}$ の式は、以下のように求められる。

付図5より $\overrightarrow{OP_l}$ は、

$$\overrightarrow{OP_l} = (X_{pl}, Y_{pl}, Z_{pl}) \quad (2-17)$$

となる。同様に、 $\overrightarrow{OE_1}$ は、  

$$\overrightarrow{OE_1} = (-E/2, 0, 0) \quad (2-18)$$

となる。

したがって、 $\overrightarrow{E_1P_1}$ は、式(2-17)と式(2-18)より  

$$\overrightarrow{E_1P_1} = (X_{p1} + E/2, Y_{p1}, Z_{p1}) \quad (2-19)$$

となる。

一方、直線の公式は、  

$$(x - x_0)/\alpha = (y - y_0)/\beta = (z - z_0)/\gamma \quad (2-20)$$

である。

したがって、式(2-19)並びに(2-20)より、

$$\alpha = X_{p1} + E/2$$

$$\beta = Y_{p1}$$

$$\gamma = Z_{p1}$$

である。また、式(2-18)より、

$$x_0 = -E/2$$

$$y_0 = 0$$

$$z_0 = 0$$

であるから、これらを式(2-20)に代入すると

$$(X + E/2)/(X_{p1} + E/2) = Y/Y_{p1} = Z/Z_{p1} \quad (2-21)$$

となる。

### 直線 $\overline{E_r P_r}$

次に、直線 $\overline{E_r P_r}$ の式を求める。

付図5より、 $\overrightarrow{OP_r}$ は、

$$\overrightarrow{OP_r} = (X_{pr}, Y_{pr}, Z_{pr}) \quad (2-22)$$

となる。同様に、 $\overrightarrow{OE_r}$ は、

$$\overrightarrow{OE_r} = (E/2, 0, 0) \quad (2-23)$$

となる。

したがって、 $\overrightarrow{E_r P_r}$ は、式(2-22)と式(2-23)より

$$\overrightarrow{E_r P_r} = (X_{pr} - E/2, Y_{pr}, Z_{pr}) \quad (2-24)$$

となる。

ここで、式(2-24)より、

$$\alpha = X_{pr} - E/2$$

$$\beta = Y_{pr}$$

$$\gamma = Z_{pr}$$

である。また、式(2-23)より、

$$x_0 = E/2$$

$$y_0 = 0$$

$$z_0 = 0$$

であるから、これらを式(2-20)に代入すると

$$(X - E/2)/(X_{pr} - E/2) = Y/Y_{pr} = Z/Z_{pr} \quad (2-25)$$

となる。

直線  $\overline{E_1 P_1}$  の式及び直線  $\overline{E_r P_r}$  の式をまとめて再掲すると以下のとおりとなる。

直線  $\overline{E_1 P_1}$  の式

$$(X + E/2) / (X_{p1} + E/2) = Y / Y_{p1} = Z / Z_{p1} \quad (2-21)$$

直線  $\overline{E_r P_r}$  の式

$$(X - E/2) / (X_{pr} - E/2) = Y / Y_{pr} = Z / Z_{pr} \quad (2-25)$$

(3) 直線  $\overline{E_1 P_1}$  と直線  $\overline{E_r P_r}$  との交点

次に、直線  $\overline{E_1 P_1}$  及び直線  $\overline{E_r P_r}$  の交点を求める。

付図5より式(2-21)及び式(2-25)は、

$$X = X_p, \quad Y = Y_p, \quad Z = Z_p$$

のとき等しくなることが分かる。

まず、 $X_p$  について解く。

式(2-21)及び式(2-25)より、

$$(X_p + E/2) / (X_{p1} + E/2) = (X_p - E/2) / (X_{pr} - E/2) \quad (2-26)$$

となる。ここで、

$$(X_{p1} + E/2) = A \quad (2-27)$$

$$(X_{pr} - E/2) = B \quad (2-28)$$

と置き換えると式(2-26)は、

$$(X_p + E/2)B = (X_p - E/2)A \quad (2-29)$$

となる。ここで、式(2-29)を変形すると、

$$X_p A - EA/2 = X_p B + EB/2 \quad (2-30)$$

となる。式(2-30)を $X_p$ についてまとめると

$$X_p(A - B) = (A + B)E/2 \quad (2-31)$$

となる。式(2-31)を $X_p$ について解くと

$$X_p = E/2 \{ (A + B) / (A - B) \} \quad (2-32)$$

となる。ここで、 $(A + B)$ 及び $(A - B)$ を式(2-27)及び式(2-28)から求め、式(2-5)、式(2-8)、式(2-9)、式(2-14)、式(2-15)、式(2-16)を代入すると、以下のようなになる。

$$\begin{aligned} A + B &= X_{pr} + X_{p1} \\ &= 2(Md x_p / z_p + D) \end{aligned} \quad (2-33)$$

$$\begin{aligned} A - B &= X_{p1} - X_{pr} + E \\ &= Mde / z_p + E - W \end{aligned} \quad (2-34)$$

式(2-32)に式(2-33)及び式(2-34)を代入すると

$$\begin{aligned} X_p &= E/2 \{ 2(Md x_p / z_p + D) / (Mde / z_p + E - W) \} \\ &= E(Md x_p / z_p + D) / (Mde / z_p + E - W) \end{aligned} \quad (2-35)$$

となる。

次に、 $Y_p$  について解く。

式(2-21)及び式(2-25)より、

$$(X_p + E/2) / (X_{p1} + E/2) = Y / Y_{p1}$$

$$(X_p - E/2) / (X_{pr} - E/2) = Y / Y_{pr}$$

ここで、式(2-27)及び式(2-28)を用いて上式を置き換えると

$$(X_p + E/2) / A = Y_p / Y_{p1} \quad (2-36)$$

$$(X_p - E/2) / B = Y_p / Y_{pr} \quad (2-37)$$

となる。

ここで、式(2-37)を $X_p$ について解くと

$$X_p = Y_p B / Y_{pr} + E/2 \quad (2-38)$$

となる。式(2-38)を式(2-36)に代入すると

$$Y_p B / Y_{pr} + E = Y_p A / Y_{p1} \quad (2-39)$$

となる。

ここで、 $Y_{pr} = Y_{p1}$ であるから、式(2-39)は、

$$Y_p = E Y_{p1} / (A - B) \quad (2-40)$$

となる。

ここで、式(2-34)及び式(2-8)を代入すると

$$Y_p = (M d y_p E / z_p) / (M d e / z_p + E - W) \quad (2-41)$$

となる。

次に、 $Z_p$ について解く。

式(2-21)及び式(2-25)より、

$$(X_p + E/2) / (X_{p1} + E/2) = Z_p / R$$

$$(X_p - E/2) / (X_{pr} - E/2) = Z_p / R$$

ここで、式(2-27)及び式(2-28)を用いて上式を置き換えると

$$(X_p + E/2) / A = Z_p / R \quad (2-42)$$

$$(X_p - E/2) / B = Z_p / R \quad (2-43)$$

となる。

ここで、式(2-43)を $X_p$ について解くと

$$X_p = Z_p B / R + E/2 \quad (2-44)$$

となる。式(2-44)を式(2-42)に代入すると

$$Z_p B / R + E = Z_p A / R \quad (2-45)$$

となる。

ここで、式(2-45)を $Z_p$ について解くと

$$Z_p = E R / (A - B) \quad (2-46)$$

となる。

ここで、式(2-34)を代入すると

$$Z_p = E R / (M d e / z_p + E - W) \quad (2-47)$$

となる。

以上、立体画像の位置をまとめて再掲すると以下のとおりとなる。

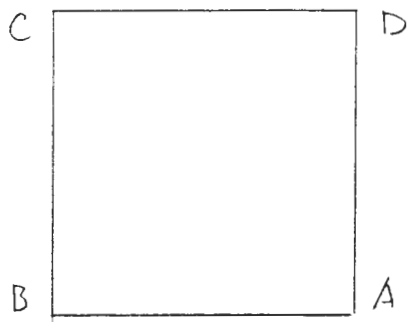
$$X_p = E (M d x_p / z_p + D) / (M d e / z_p + E - W)$$

$$Y_p = (M d y_p E / z_p) / (M d e / z_p + E - W)$$

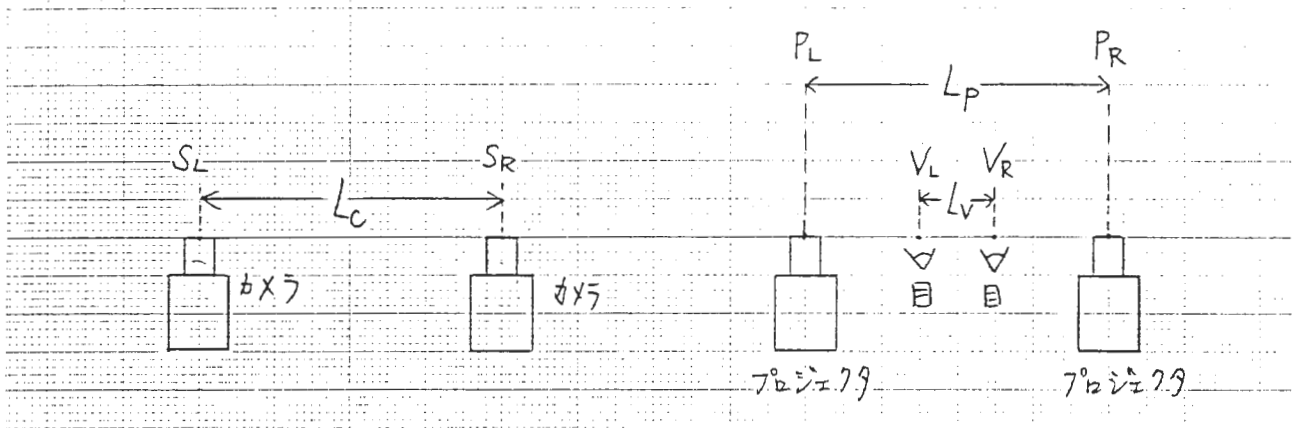
$$Z_p = E R / (M d e / z_p + E - W)$$

表2. 1 立体表示手段

立体表示手段	視野			実空間との連続性	観察者数制限	見る位置と画像歪	特殊なメガネの有無
	広視野化	見たい所が見れる	見たい所から見れる				
スクリーン投影形	難	表示スクリーン内のみ	表示スクリーンが見える領域内	ない	ない	見る位置に関係する	有り
レンティキュラスクリン	難	表示スクリーン内のみ	表示スクリーンが見える領域内	ない	ない	見る位置に関係しない	無し
全体視スクリーン	広視野	見れる(床下を除く)	全体視スクリーン内	ある(床下を除く)	ない	見る位置に関係する	有り
ヘッド・マウンテッドディスプレイ(H.M.D.形)	広視野	見れる	見れる	ある	ある	見る位置に関係しない	ディスプレイを頭にかぶる
ホログラフィ	難	見れる	見れる	ない	ない	見る位置に関係しない	無し



————— スクリーン



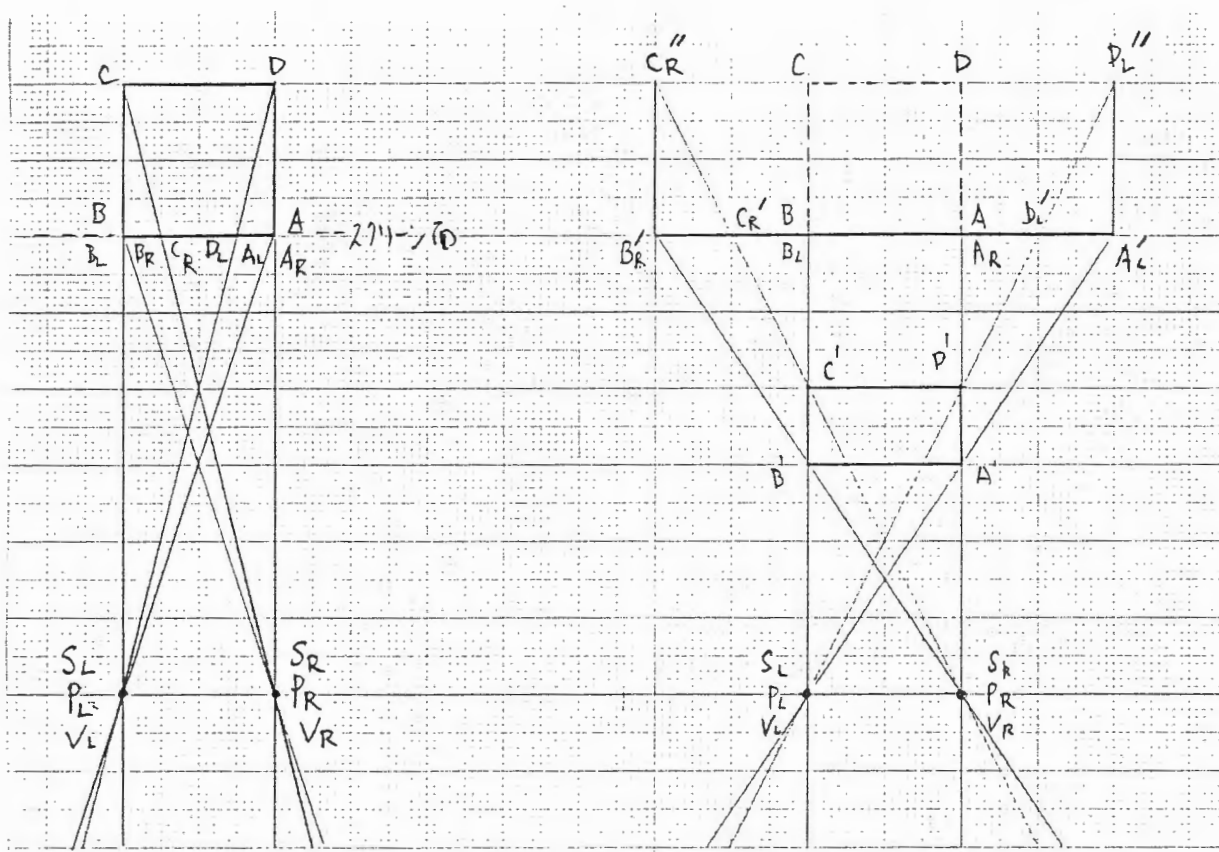
(a) 撮影系

(b) 投影系

- (注)  $L_U$ : 両眼の間隔、 $L_C$ : 撮影カメラの間隔、 $L_P$ : 投影プロジェクタの間隔、  
 $S_L$ : 左側カメラの撮影位置、 $S_R$ : 右側カメラの撮影位置、  
 $P_L$ : 左側プロジェクタの投影位置、 $P_R$ : 右側プロジェクタの投影位置、  
 $V_L$ : 左目の位置、 $V_R$ : 右目の位置、

図3. 1 撮影・投影系のモデル

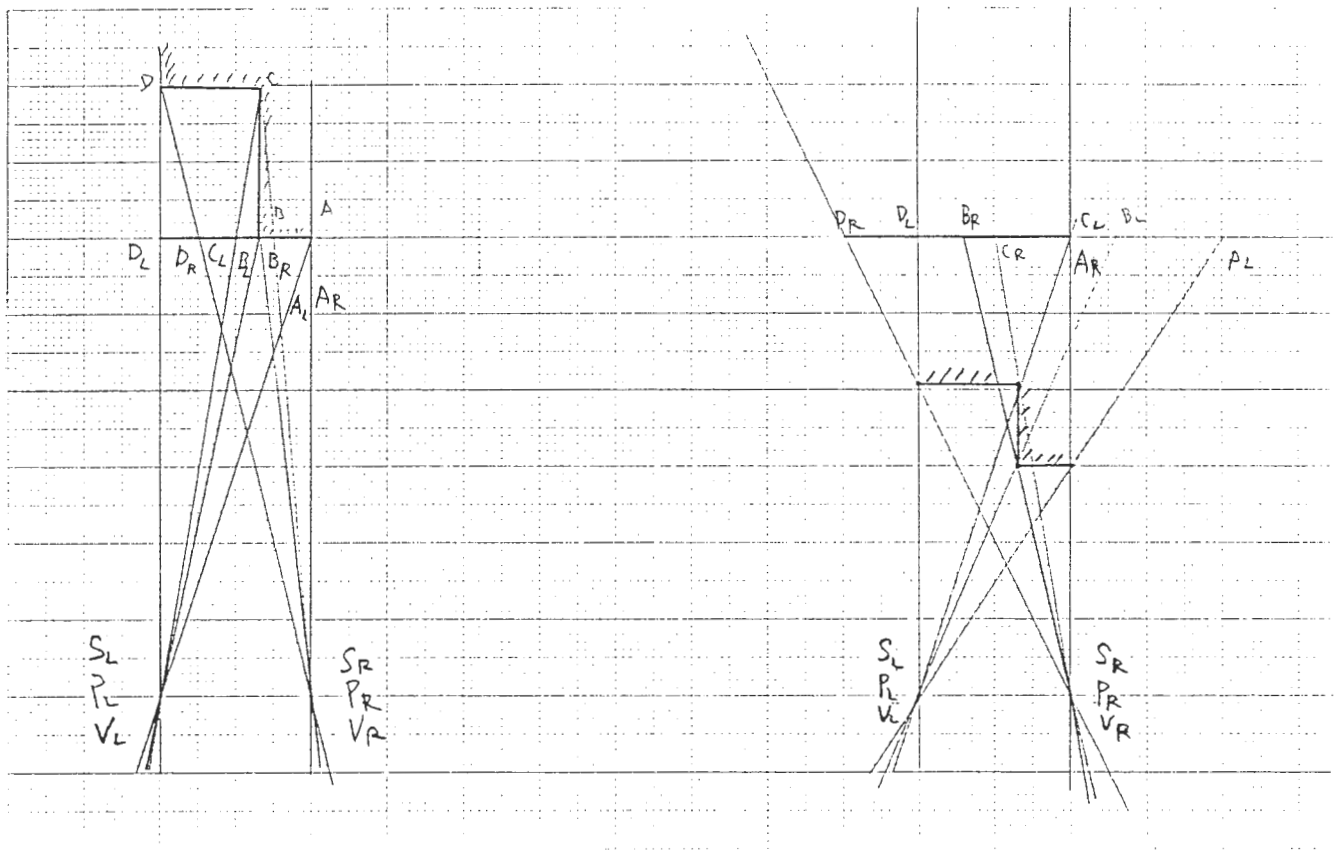




(a) 倍率=1のとき

(b) 倍率=nのとき

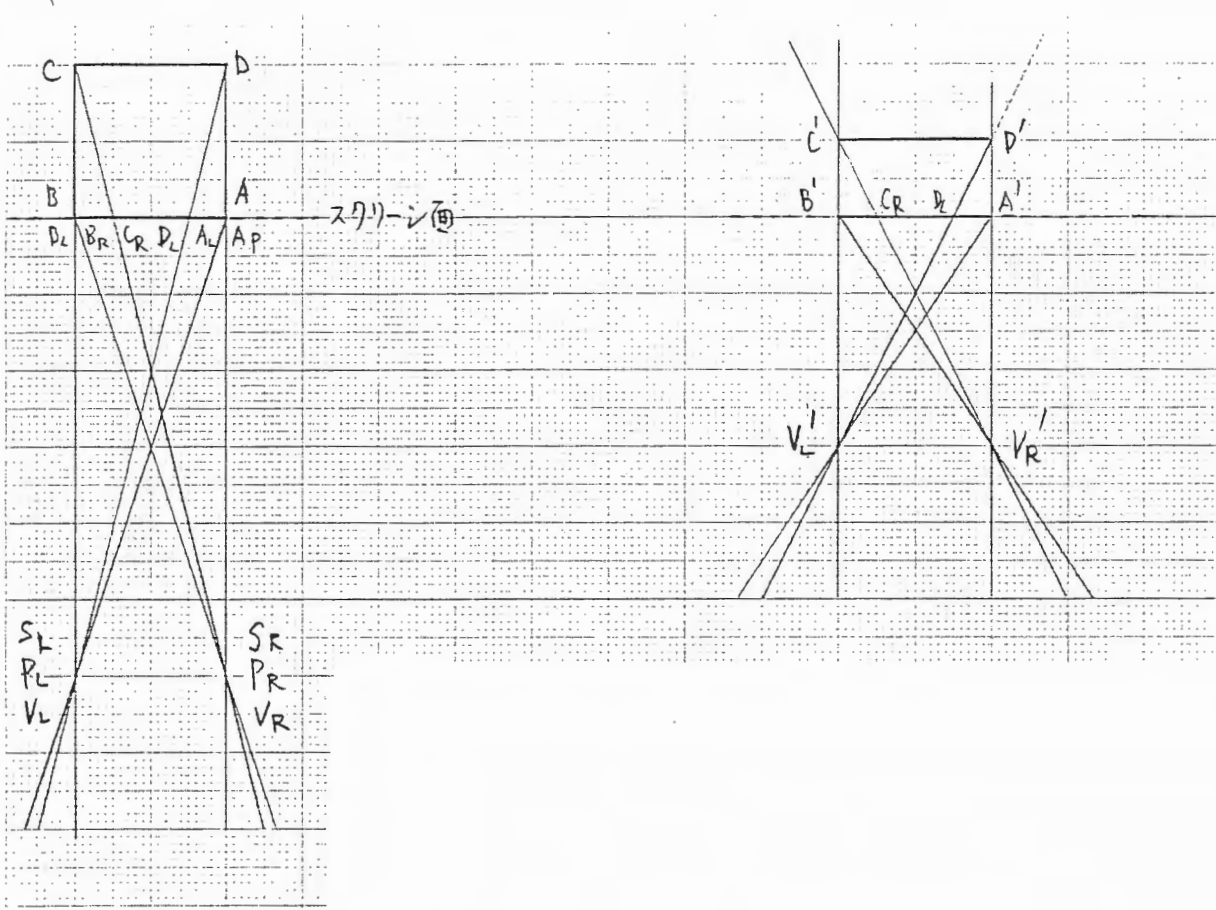
図3. 2 表示倍率をn倍した場合  $L_U=L_P=L_C$   
 (カメラ・プロジェクタの光軸は、スクリーンに垂直とする)



(a) 倍率=1のとき

(b) 倍率=nのとき

図3.3 表示倍率をn倍した場合  $L_u = L_p = L_c$   
 (カメラ・プロジェクタの光軸は、スクリーンに垂直とする)



(a) 視距離変更前

(b) 視距離 =  $1/n$  のとき

図3.4 視距離を  $1/n$  倍とした場合  $L_U = L_P = L_C$   
 (カメラ・プロジェクタの光軸は、スクリーンに垂直、撮影時・投影時の倍率は同じ)

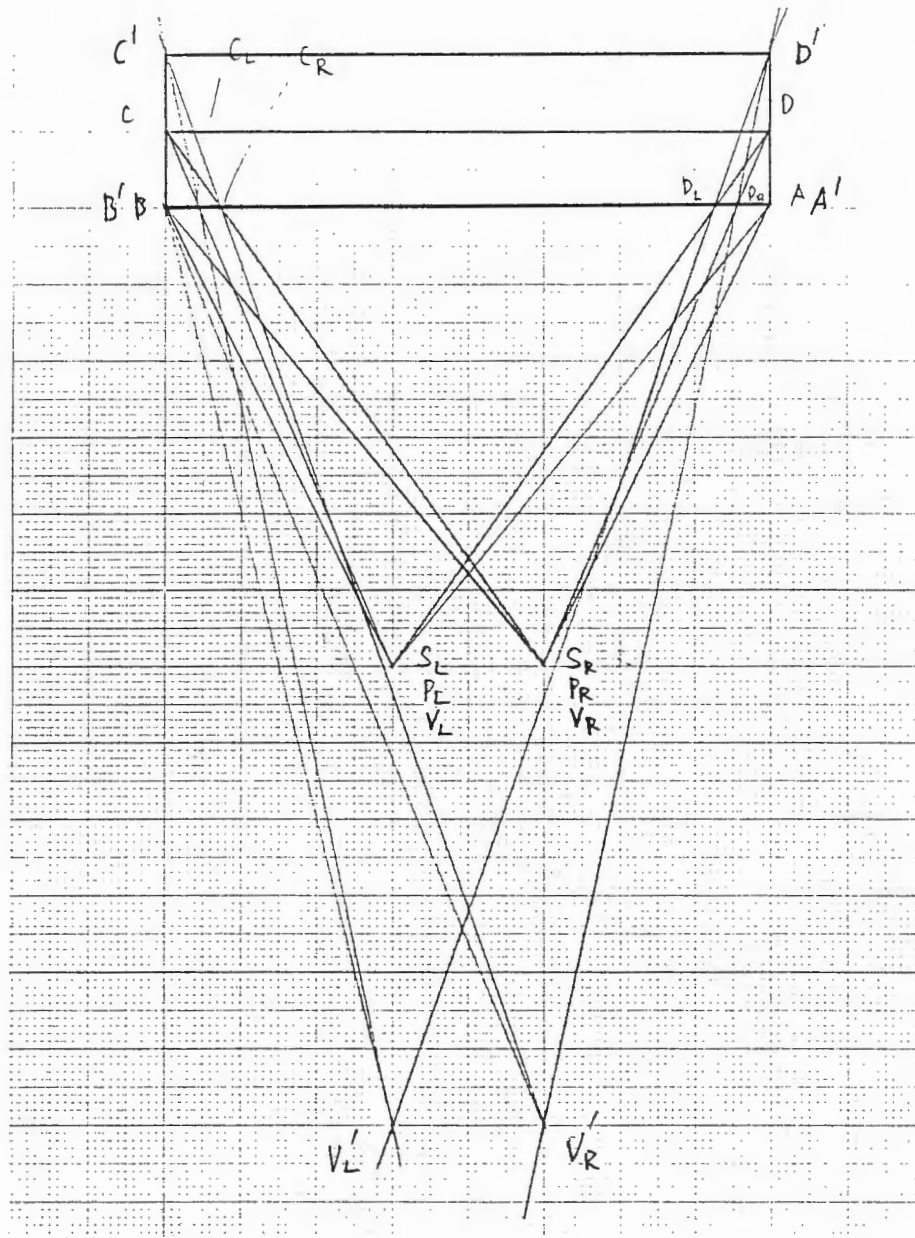


図3. 5 視距離を  $n$  倍とした場合  $L_u = L_p = L_c$   
 (カメラ・プロジェクタの光軸は、スクリーンに垂直、 $\overline{AB} > L_c$ )

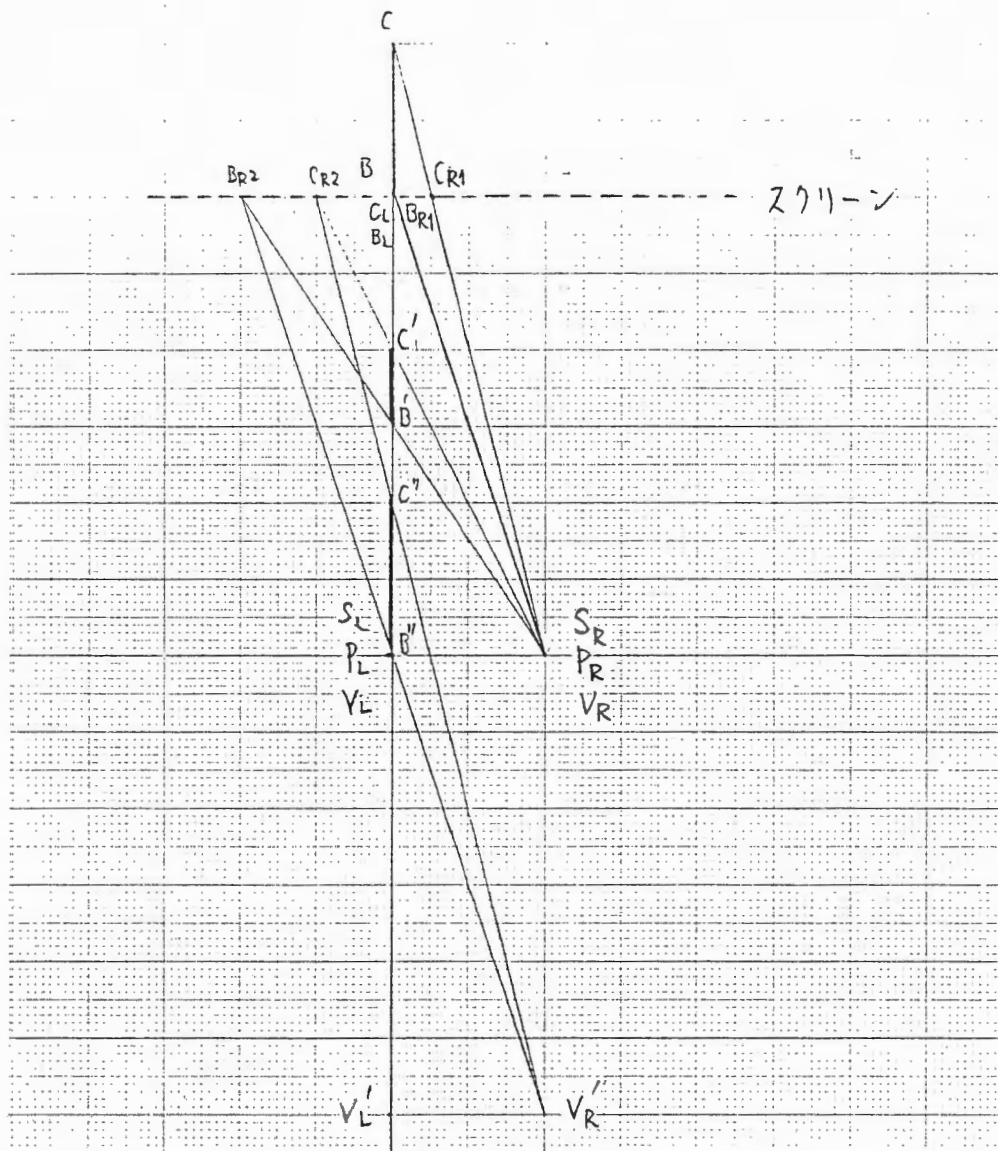


図 3. 6 表示倍率を  $n$  倍し ( $CR_1 \rightarrow CR_2$ ,  $BR_1 \rightarrow BR_2$ , 像は  $B' C'$ )、次に視距離を  $n$  倍とした場合 ( $VL \rightarrow VL'$ ,  $VR \rightarrow VR'$ , 像は  $B'' C''$ )  
 $L_U = L_P = L_C$  (カメラ・プロジェクタの光軸は、スクリーンに垂直とする)

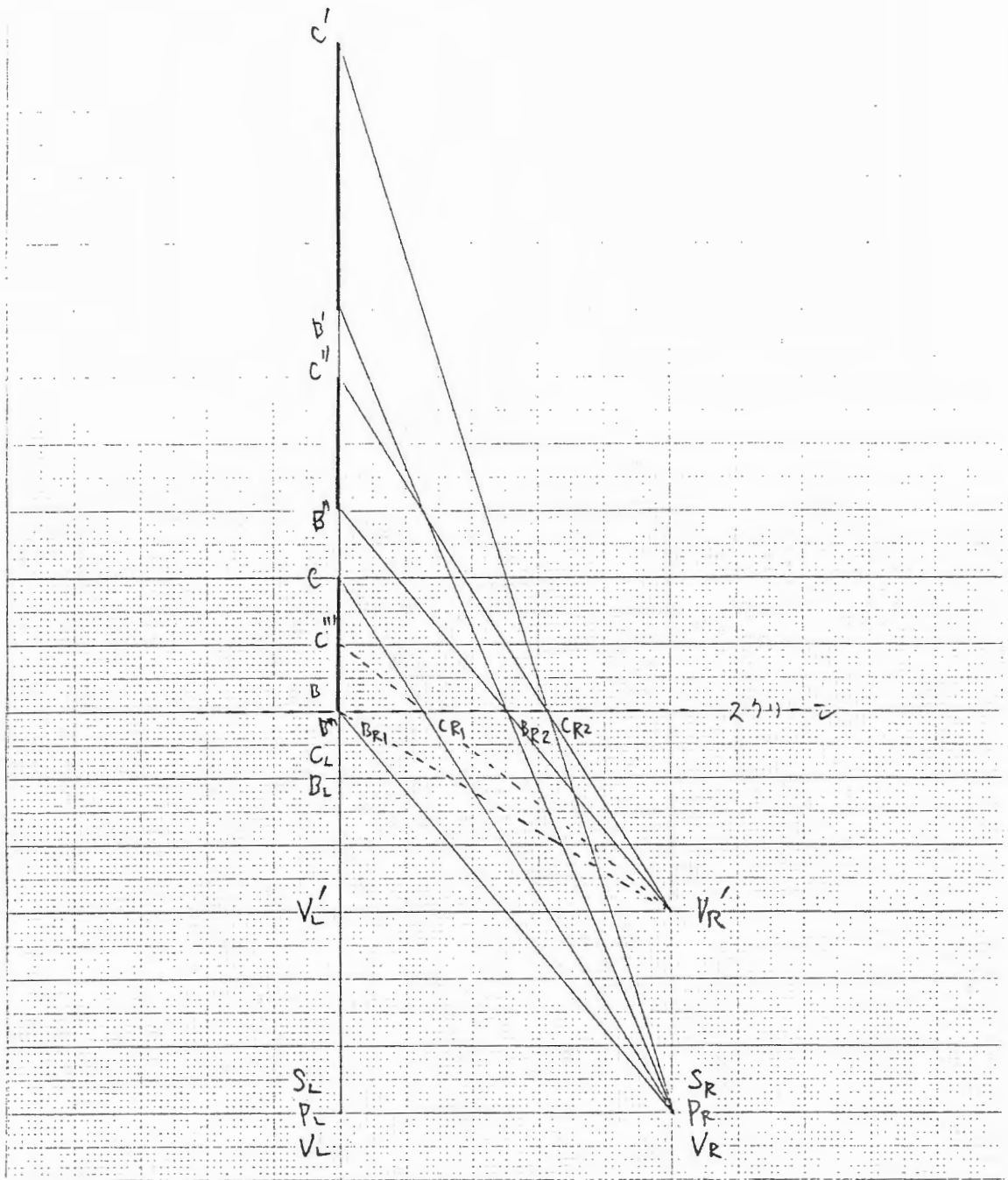


図3. 7 視距離を  $1/n$  倍とし ( $V_L \rightarrow V_L'$ 、 $V_R \rightarrow V_R'$ 、像は  $B'''C'''$ )、次に表示倍率を  $1/n$  倍 ( $BR_1 \rightarrow BR_2$ 、 $CR_1 \rightarrow CR_2$ 、像は  $B''C''$ ) とした場合  $L_U = L_P = L_C$  (カメラ・プロジェクタの光軸は、スクリーンに垂直とする)

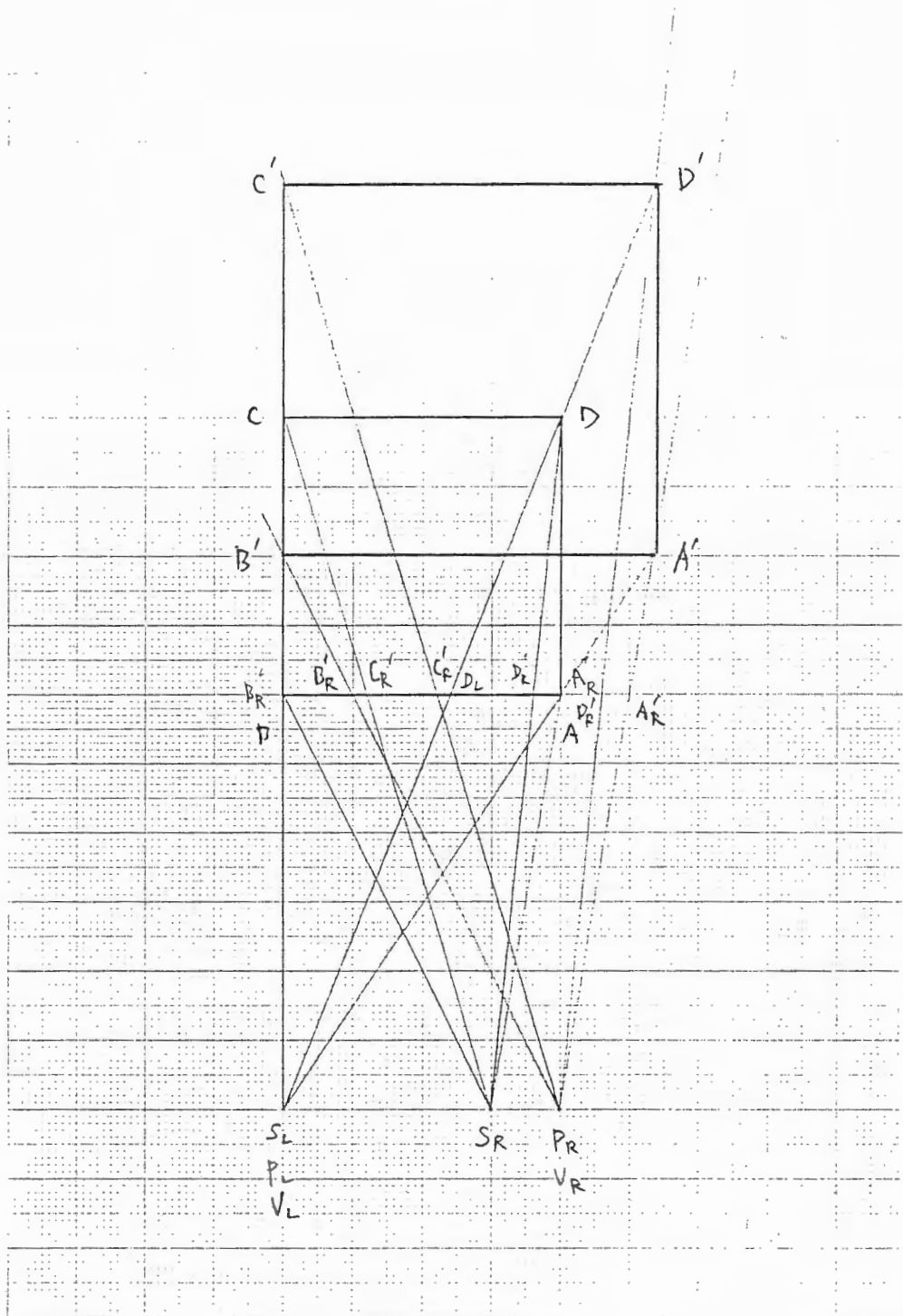


図3. 8  $L_u = L_p > L_c$   
 (カメラ・プロジェクタの光軸は、スクリーンに垂直とする)

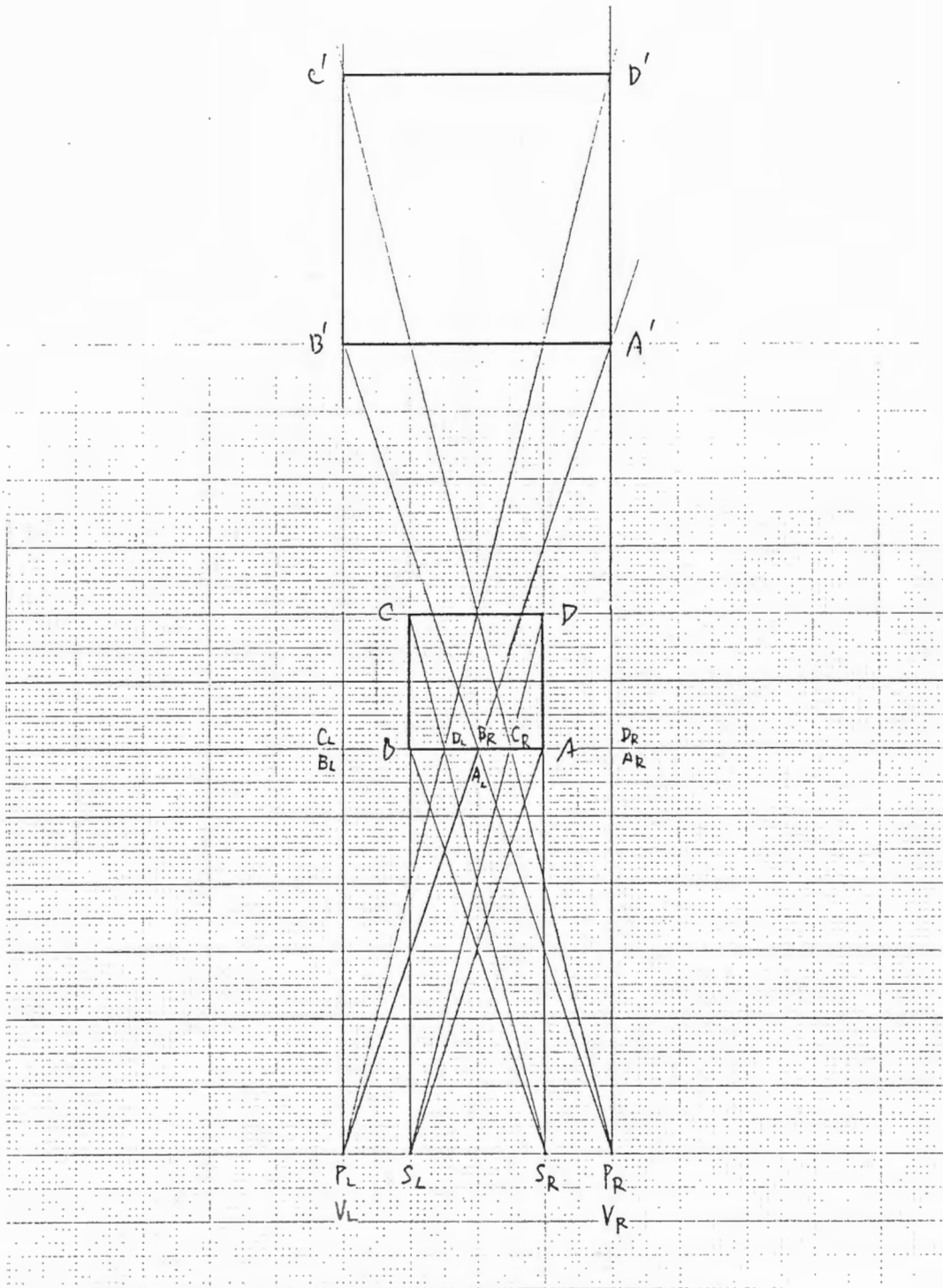


図3. 9  $L_u = L_p > L_c$   
 (カメラ・プロジェクタの光軸は、スクリーンに垂直とする)



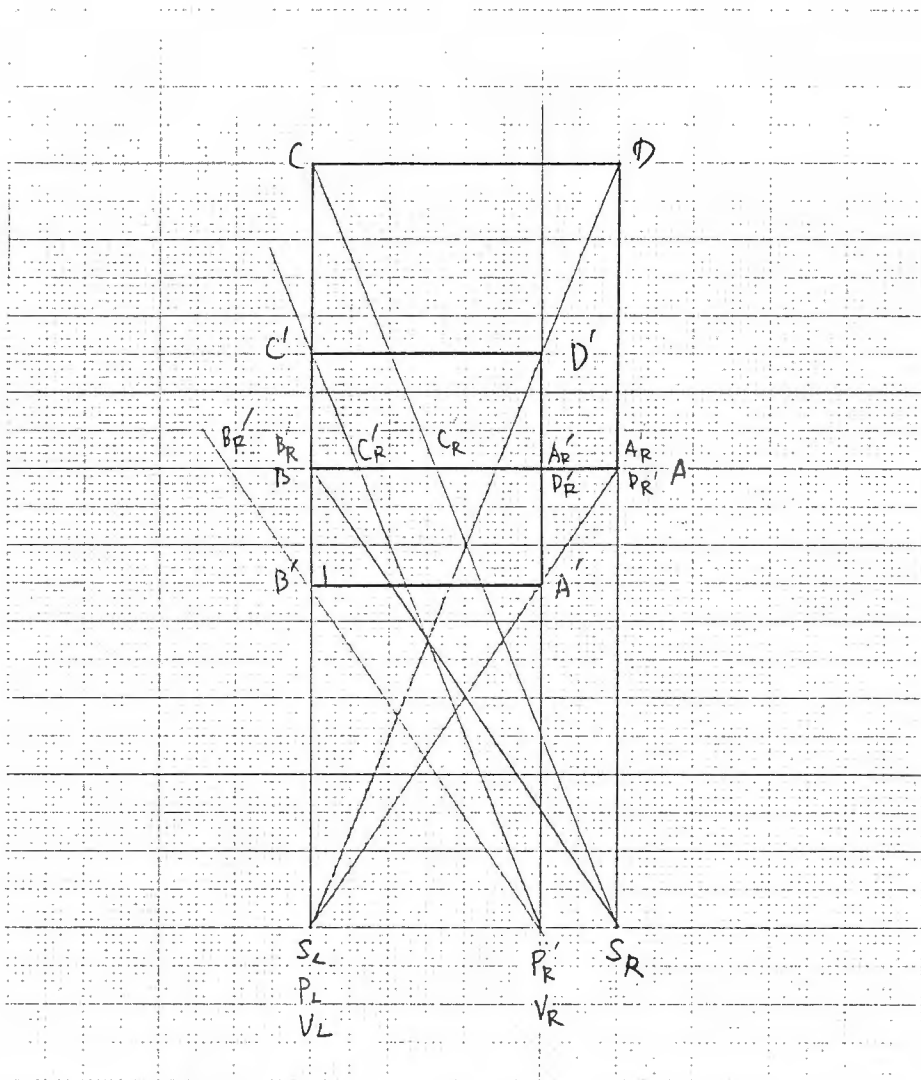


図 3. 10  $L_U = L_P < L_C$   
 (カメラ・プロジェクタの光軸は、スクリーンに垂直とする)

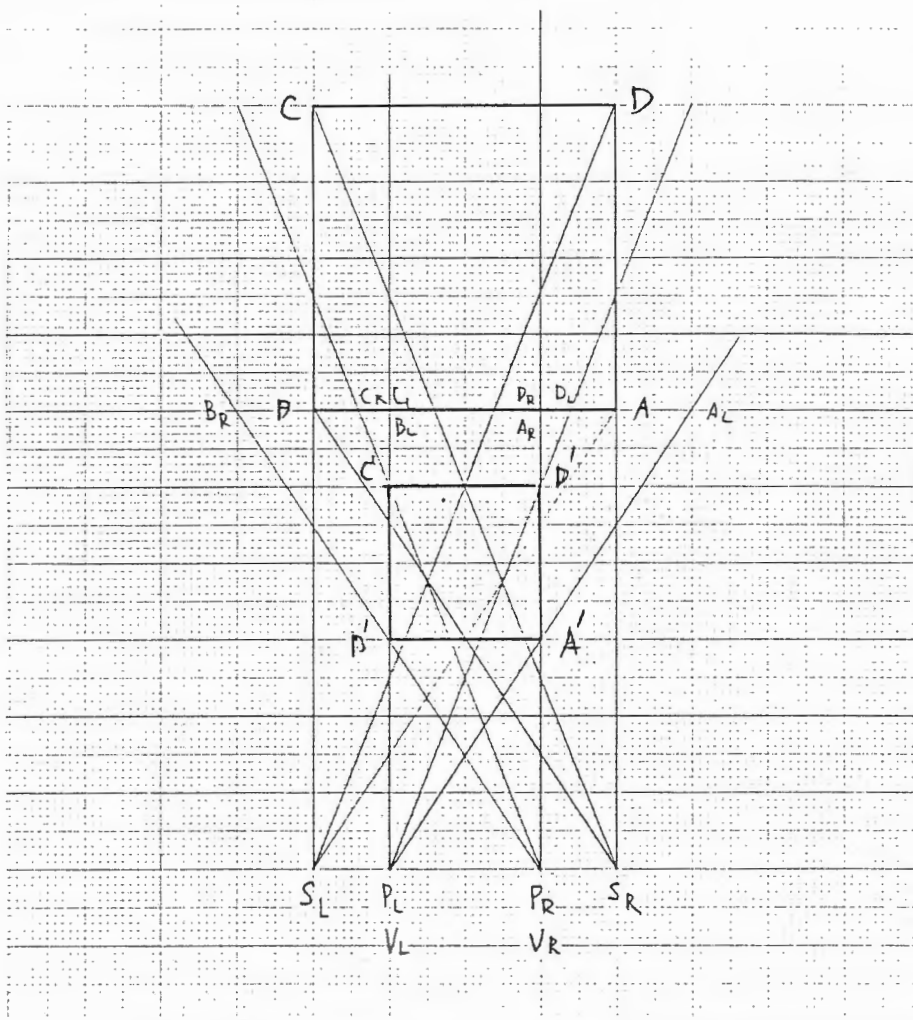


図3. 11  $L_u = L_p < L_c$   
 (カメラ・プロジェクタの光軸は、スクリーンに垂直とする)

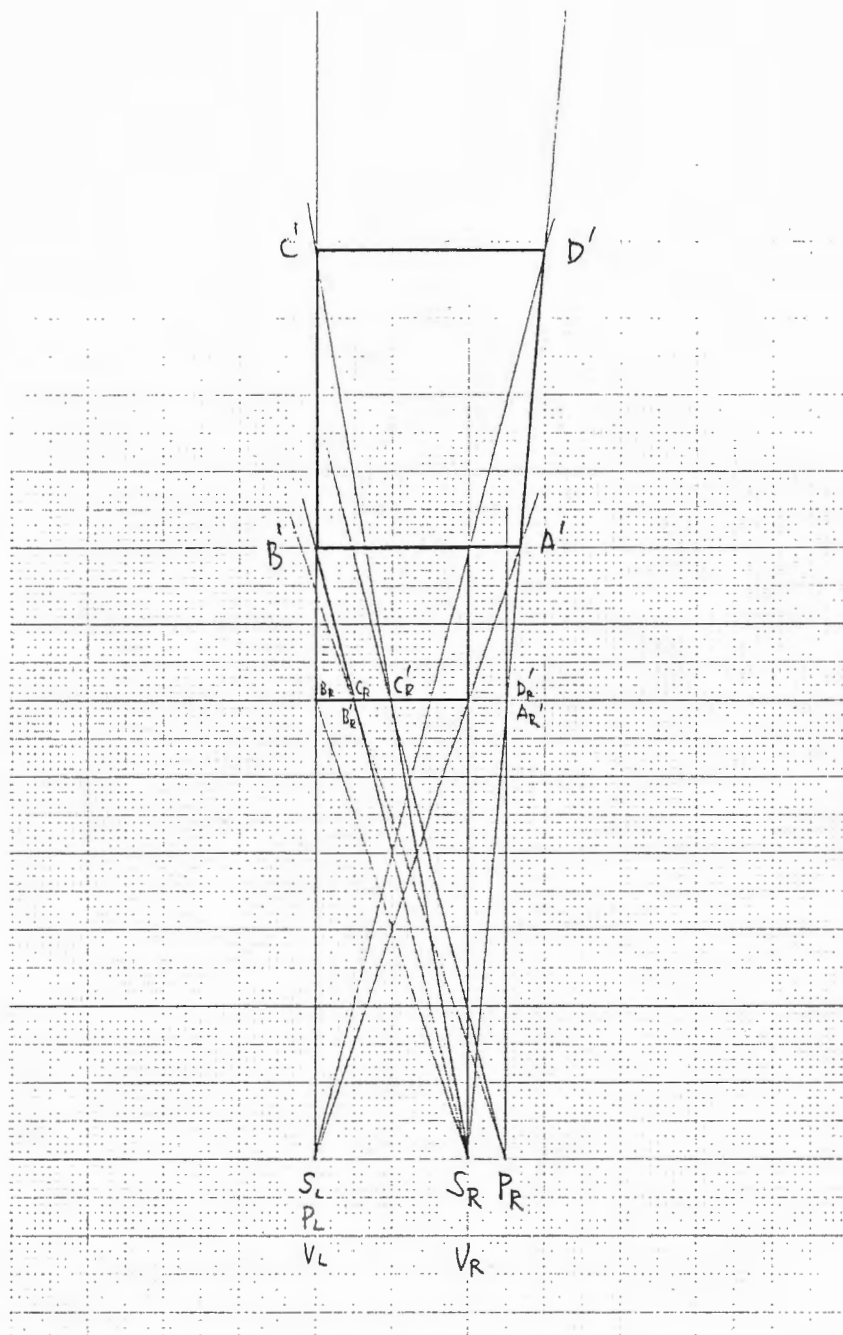


図 3. 12  $L_u = L_c < L_p$   
 (カメラ・プロジェクタの光軸は、スクリーンに垂直とする)

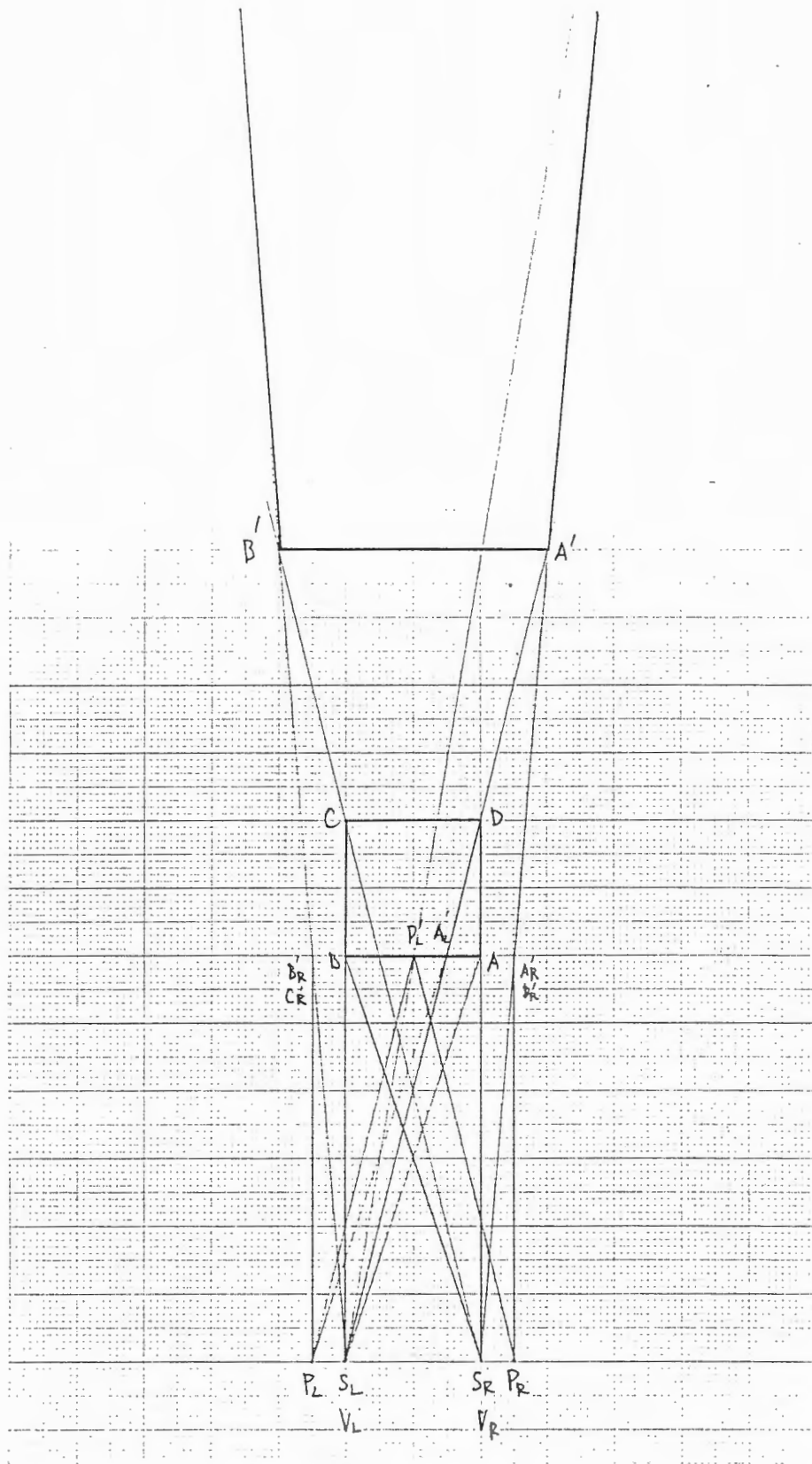


図 3. 13  $L_U = L_C < L_P$   
 (カメラ・プロジェクタの光軸は、スクリーンに垂直とする)

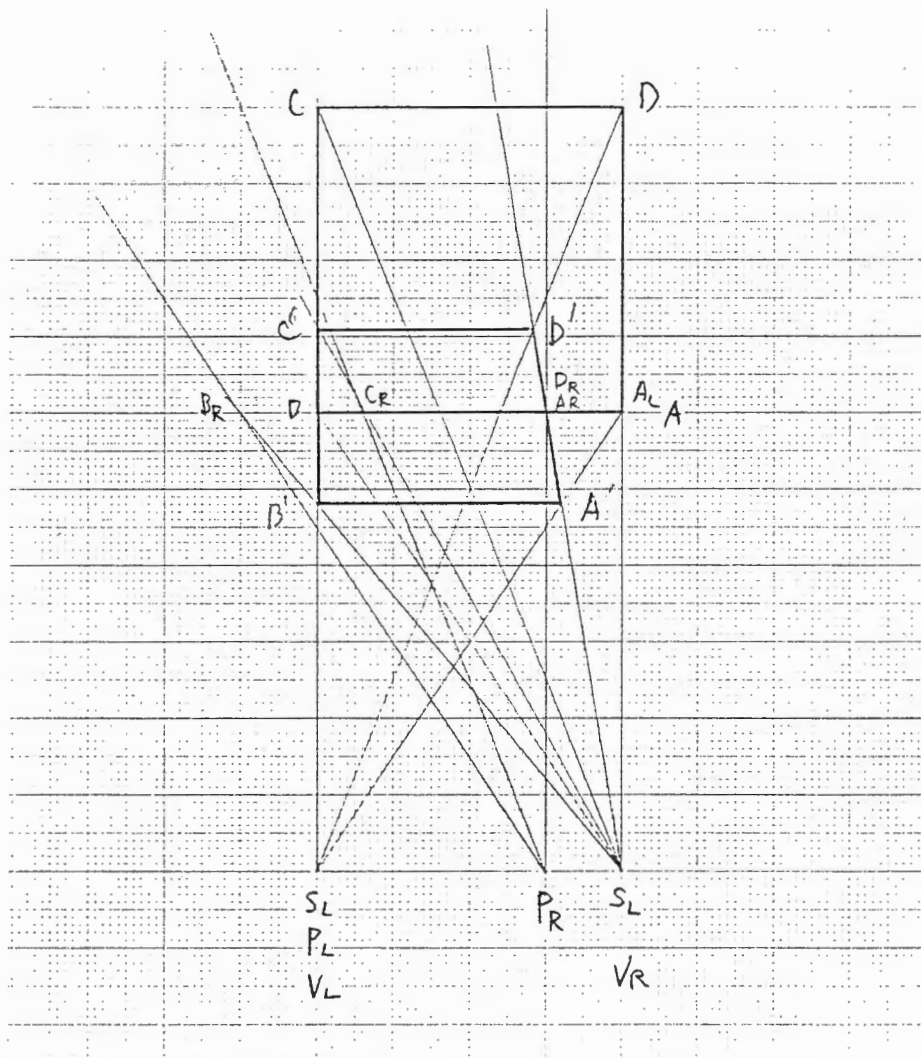


図 3. 14  $L_v = L_c > L_p$   
 (カメラ・プロジェクタの光軸は、スクリーンに垂直とする)

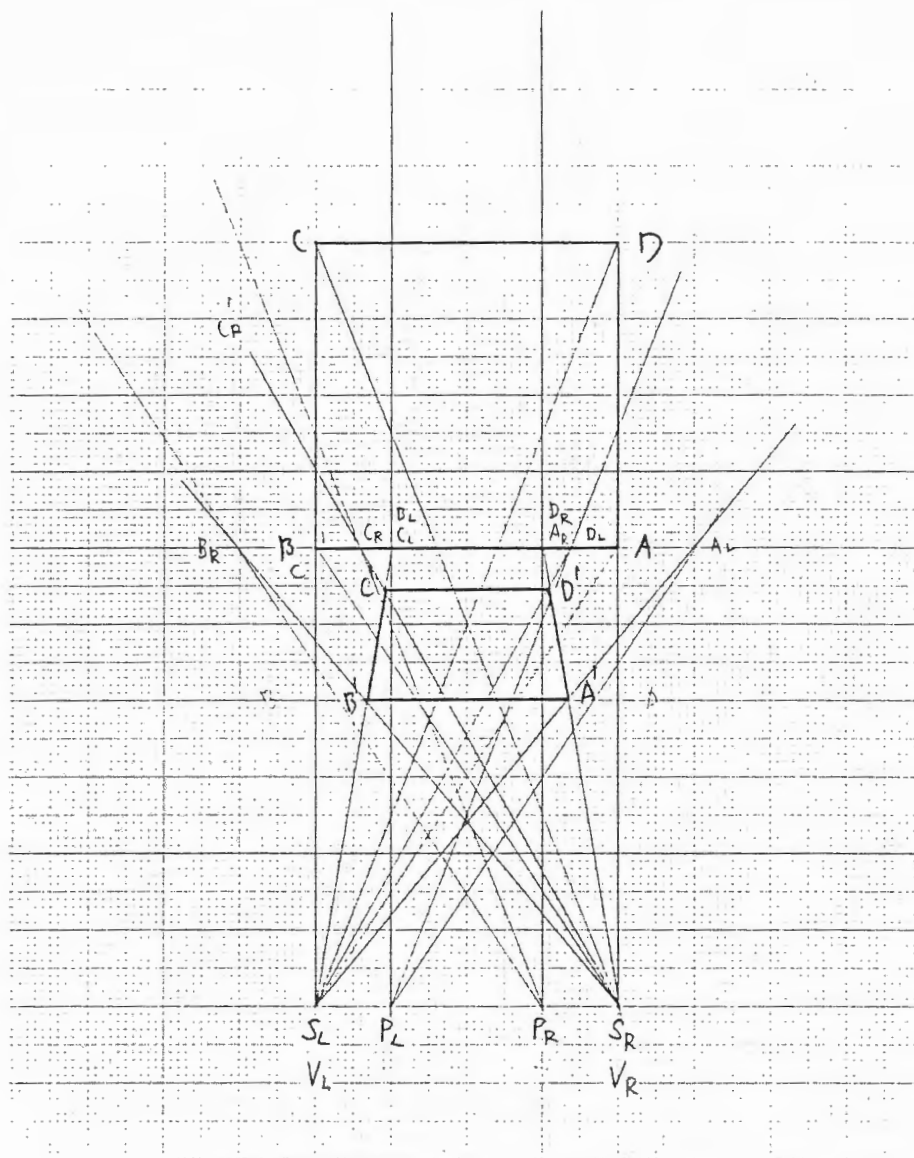


図3. 15  $L_u = L_c > L_p$   
 (カメラ・プロジェクタの光軸は、スクリーンに垂直とする)

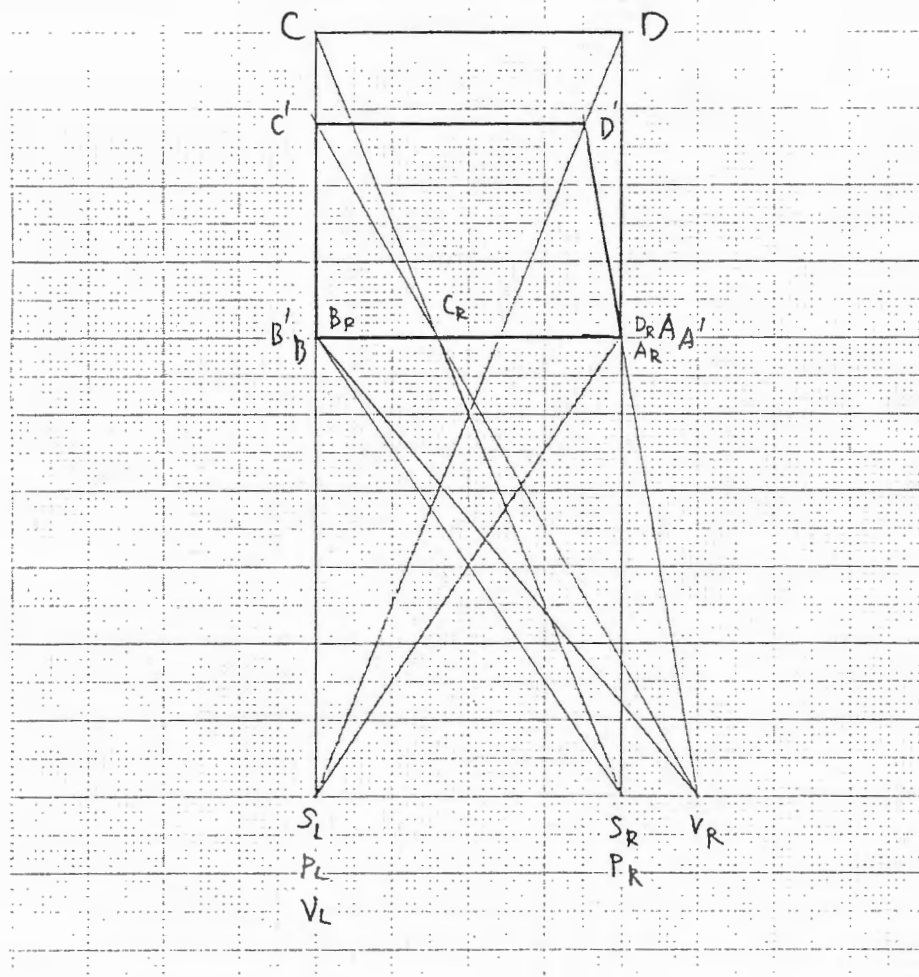


図3. 16  $L_C = L_P < L_U$   
 (カメラ・プロジェクタの光軸は、スクリーンに垂直とする)

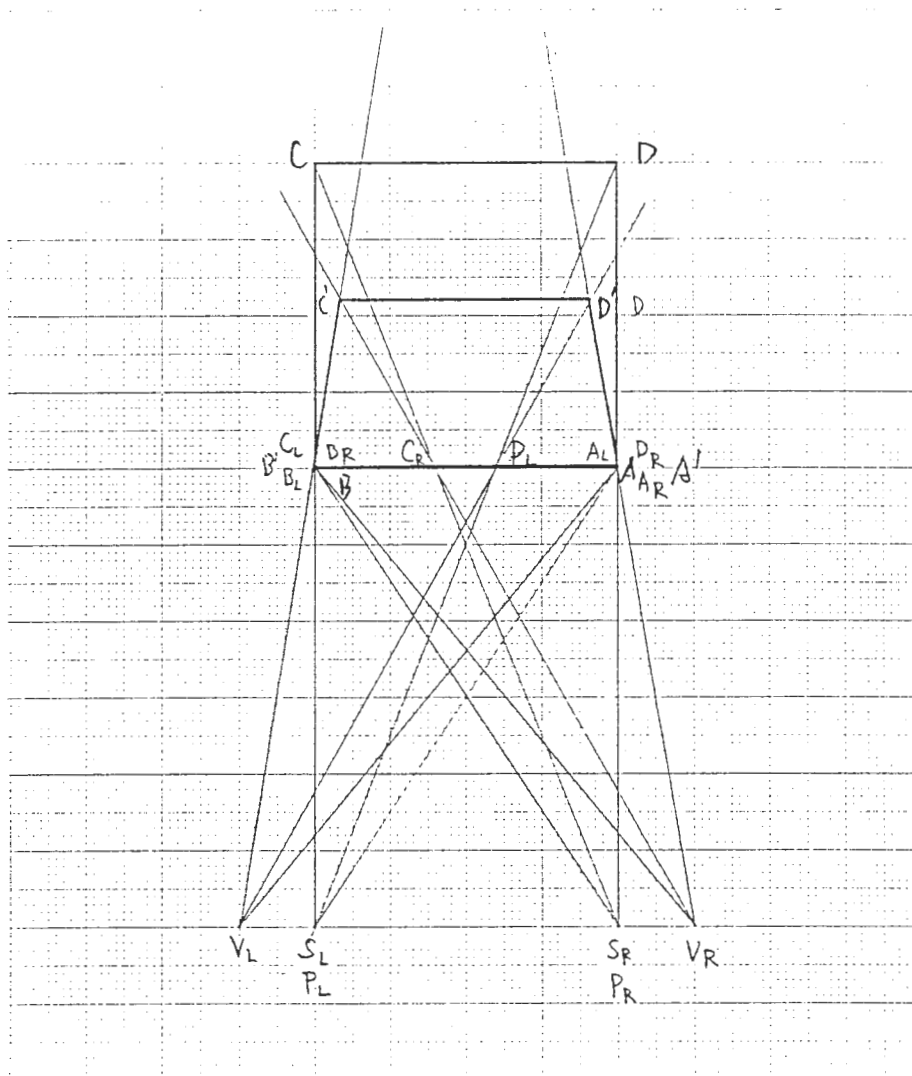


図3. 17  $L_c = L_p < L_u$   
 (カメラ・プロジェクタの光軸は、スクリーンに垂直とする)



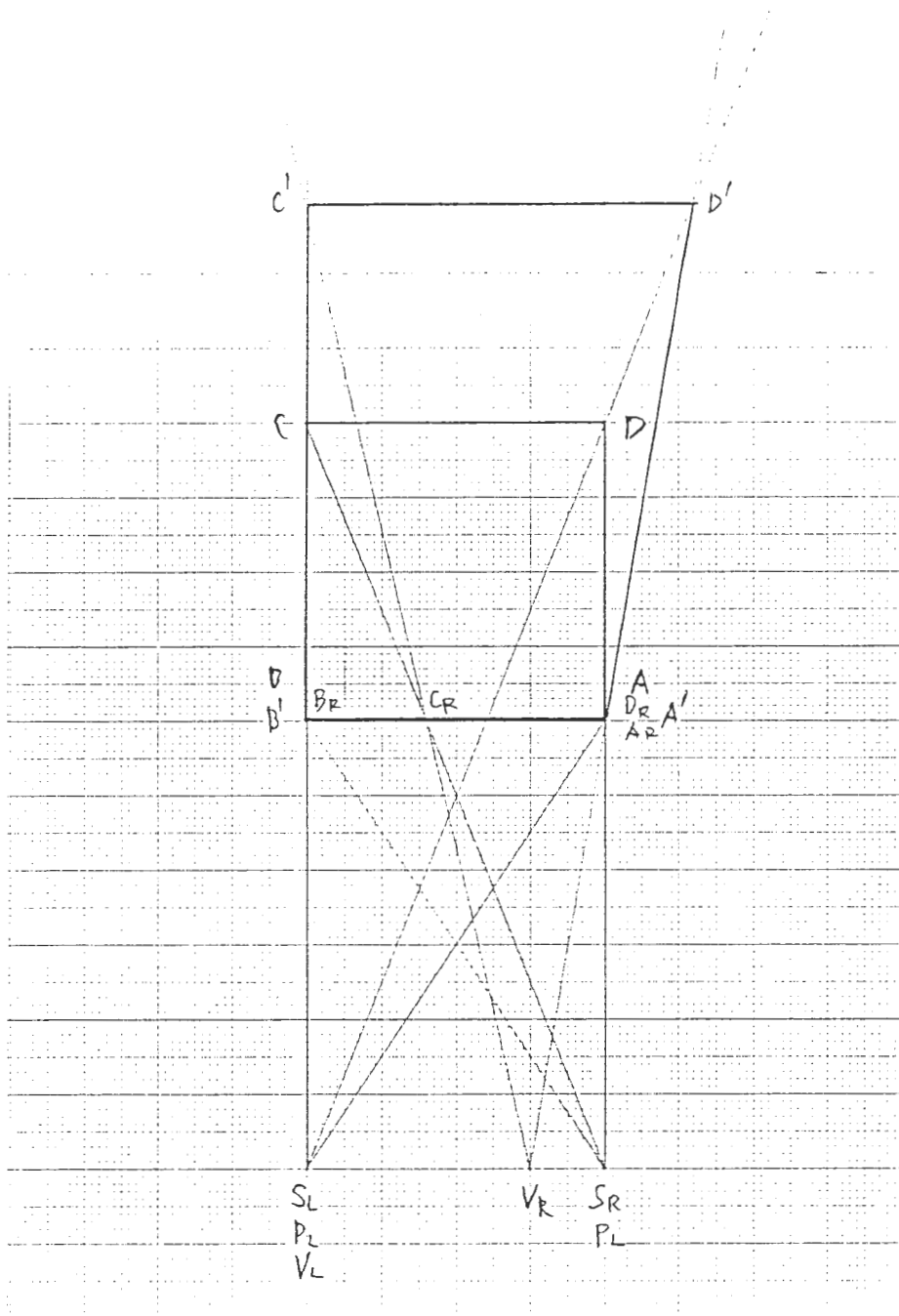


図 3. 18  $L_c = L_p > L_u$   
 (カメラ・プロジェクタの光軸は、スクリーンに垂直とする)

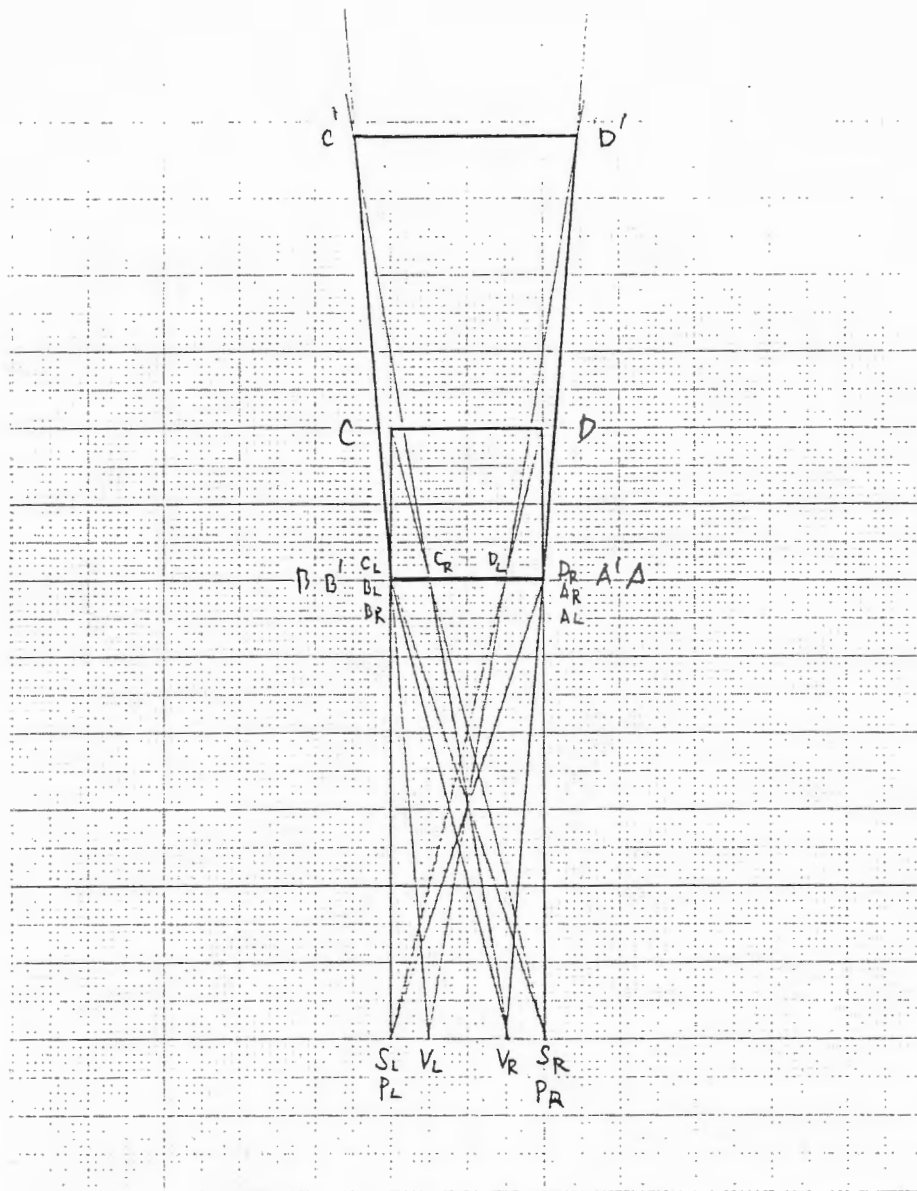


図3. 19  $L_c = L_p > L_v$   
 (カメラ・プロジェクタの光軸は、スクリーンに垂直とする)

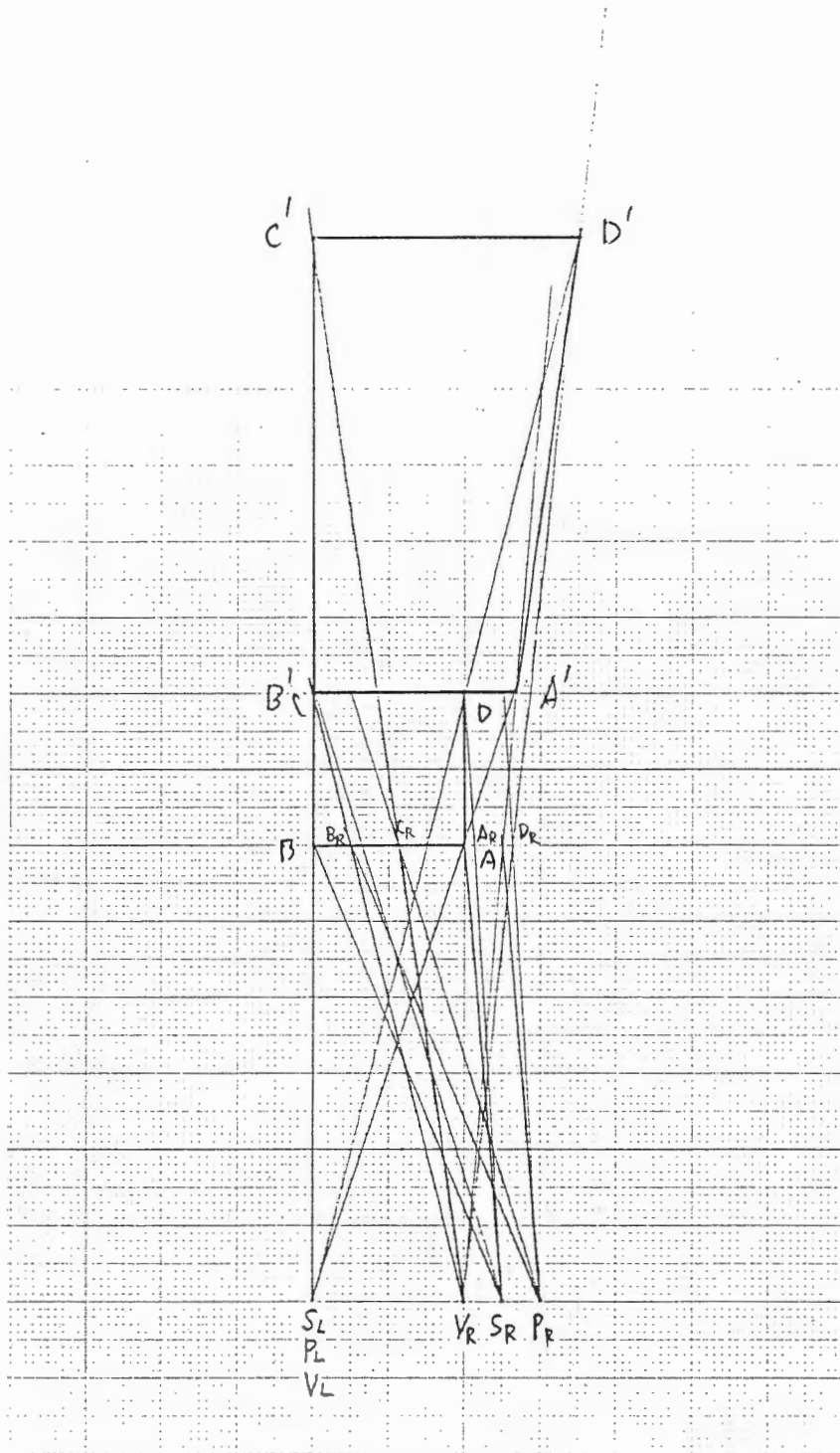


図 3. 20  $L_u < L_c < L_p$   
 (カメラ・プロジェクタの光軸は、スクリーンに垂直とする)

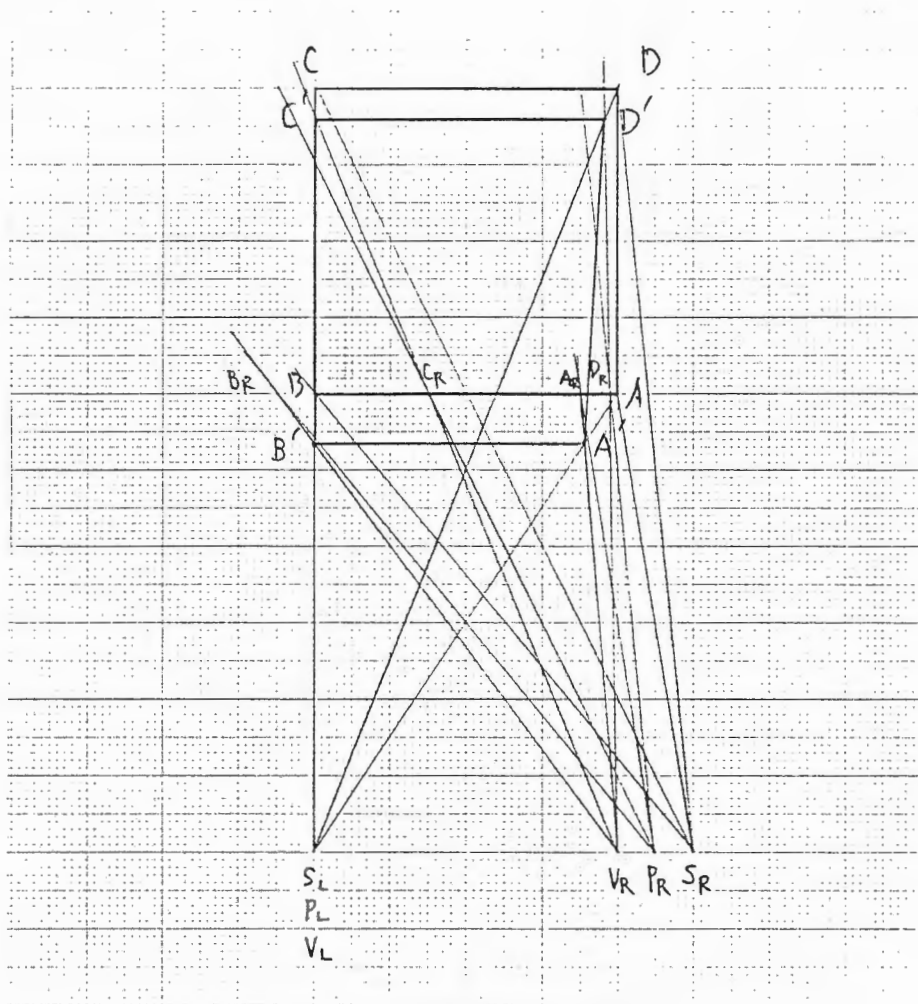


図 3. 21  $L_u < L_p < L_c$   
 (カメラ・プロジェクタの光軸は、スクリーンに垂直とする)

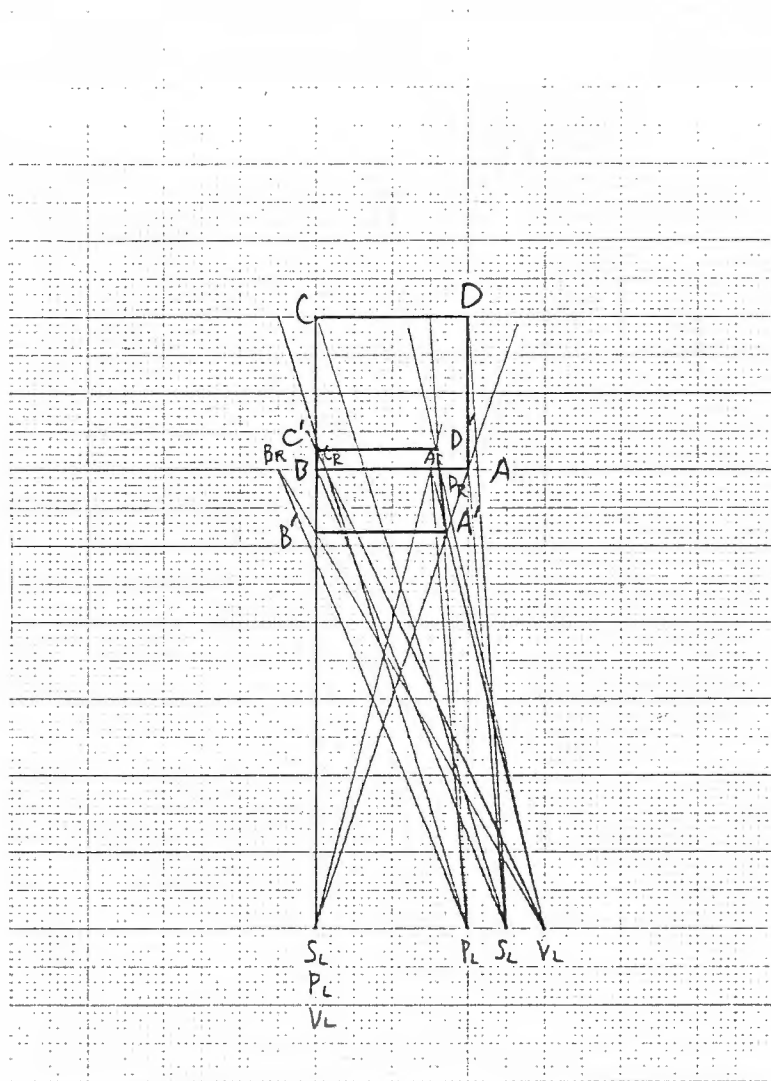


図 3. 22  $L_p < L_c < L_u$   
 (カメラ・プロジェクタの光軸は、スクリーンに垂直とする)

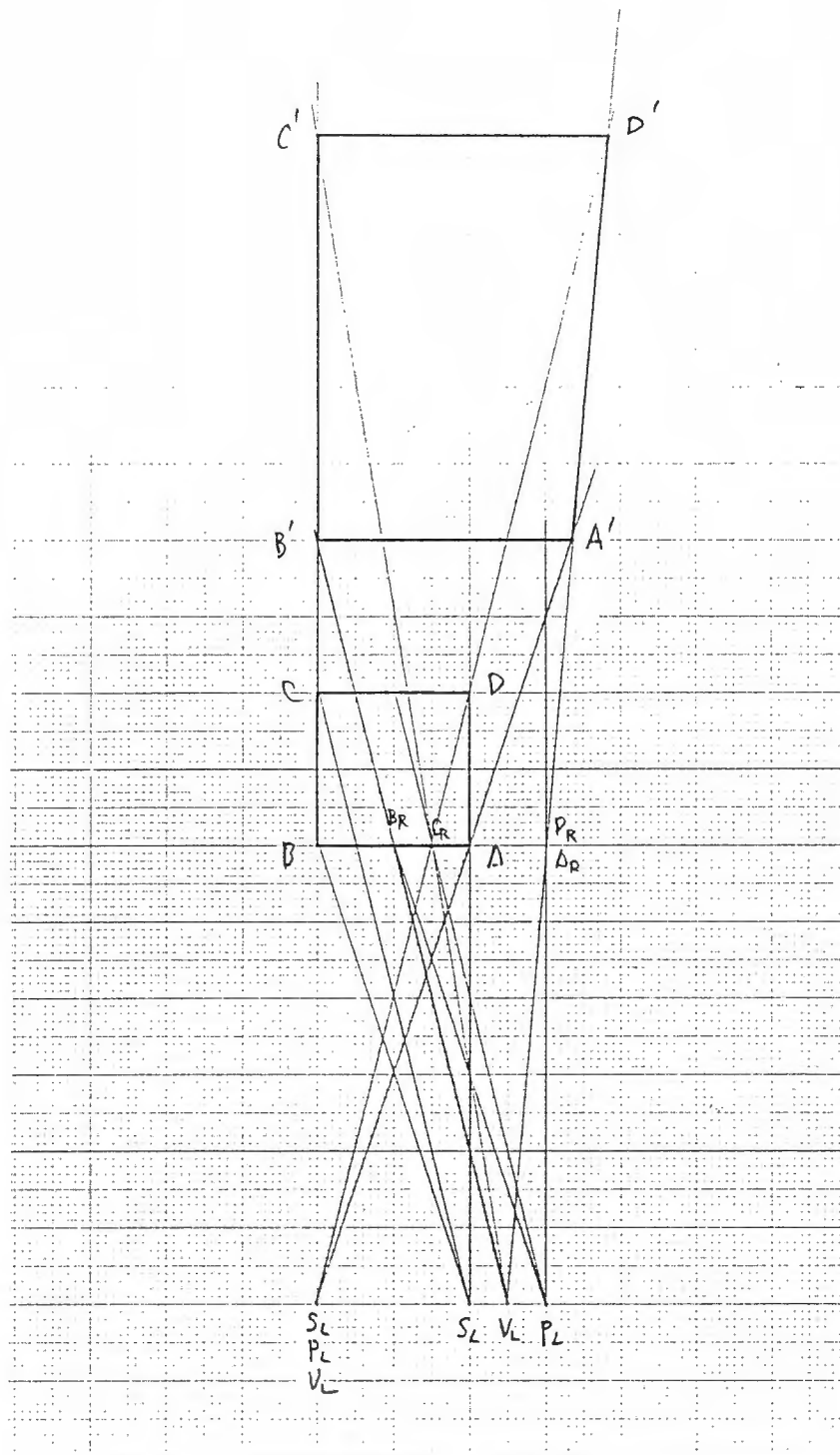


図 3. 23  $L_C < L_U < L_P$

(カメラ・プロジェクタの光軸は、スクリーンに垂直とする)

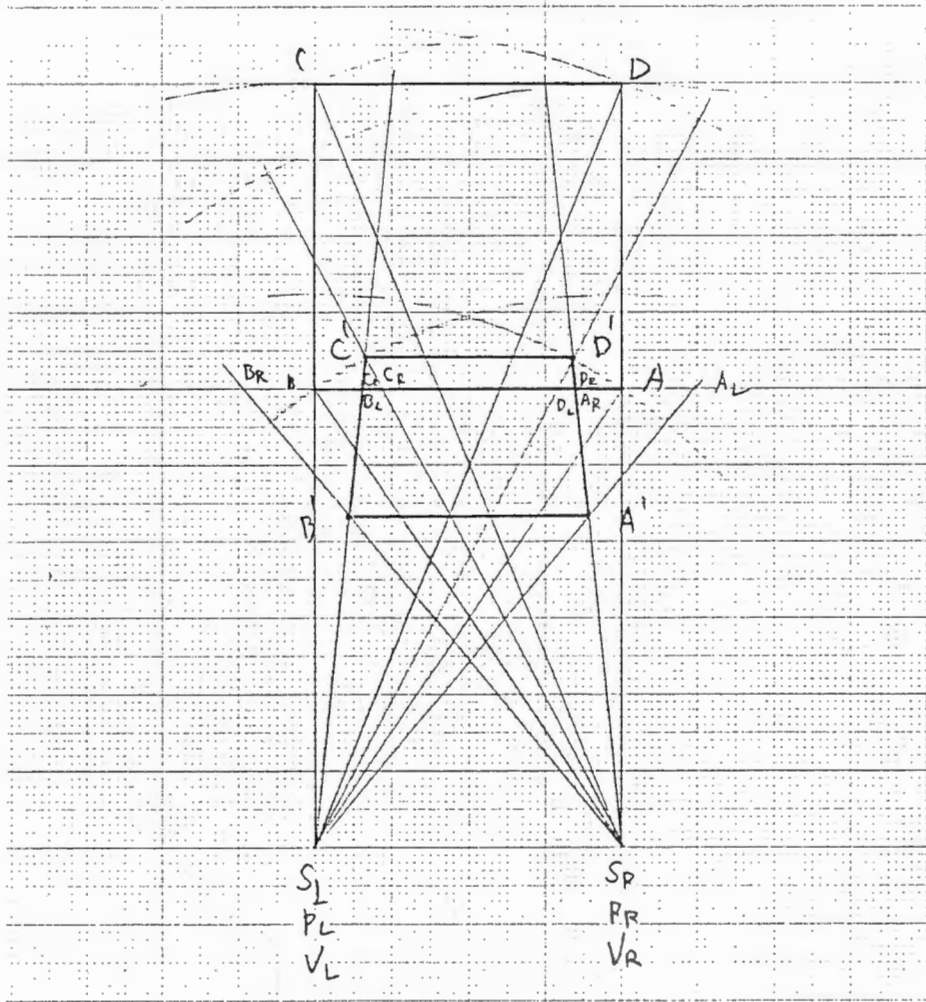


图 3. 24 摄影时  $\uparrow\uparrow$  投影时  $\nearrow\searrow$   $L_U = L_P = L_C$

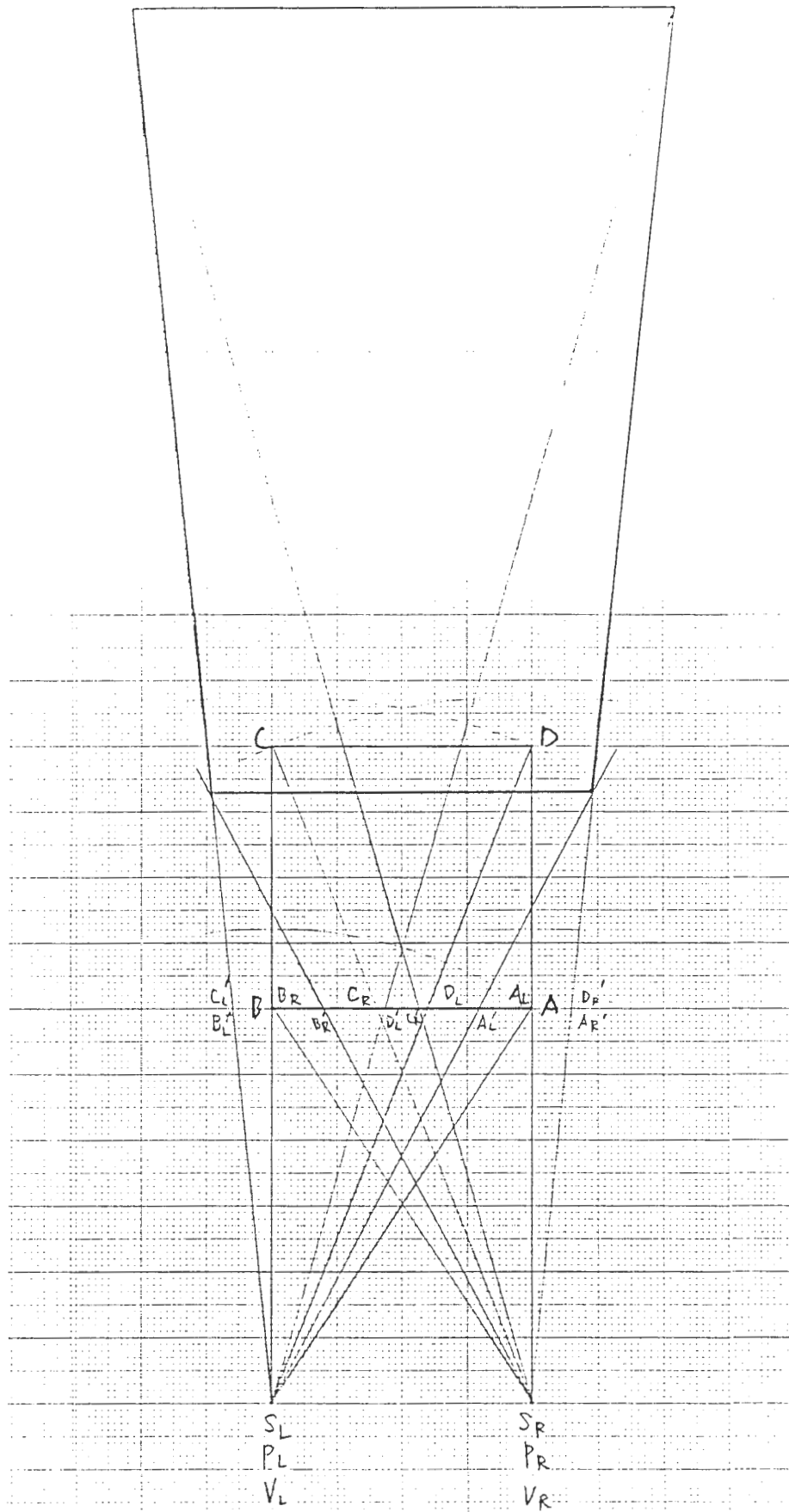


图 3. 25 摄影时 ↗ ↖ 投影时 ↑ ↑  $L_U = L_P = L_C$



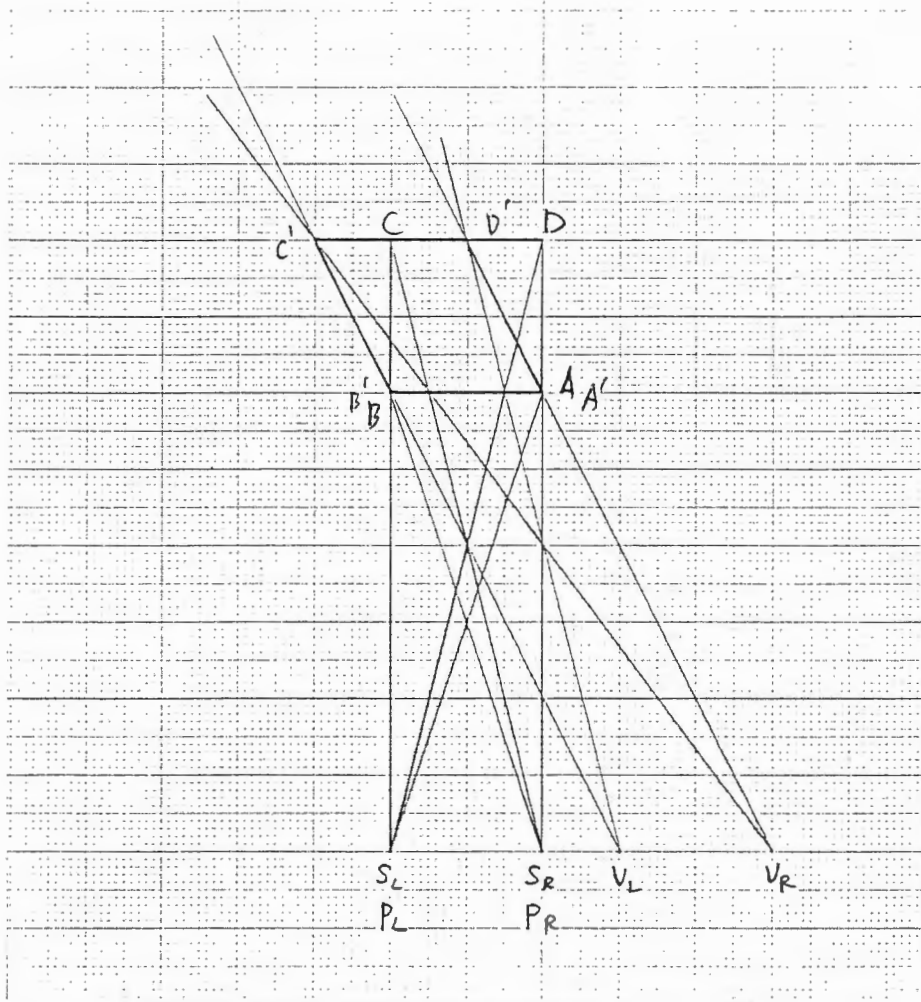


図 3. 26 観察点  $V_L V_R$  をスクリーンに対して平行に移動させた場合  
 撮影点  $S_L S_R =$  投影点  $P_L P_R$   $L_U = L_P = L_C$

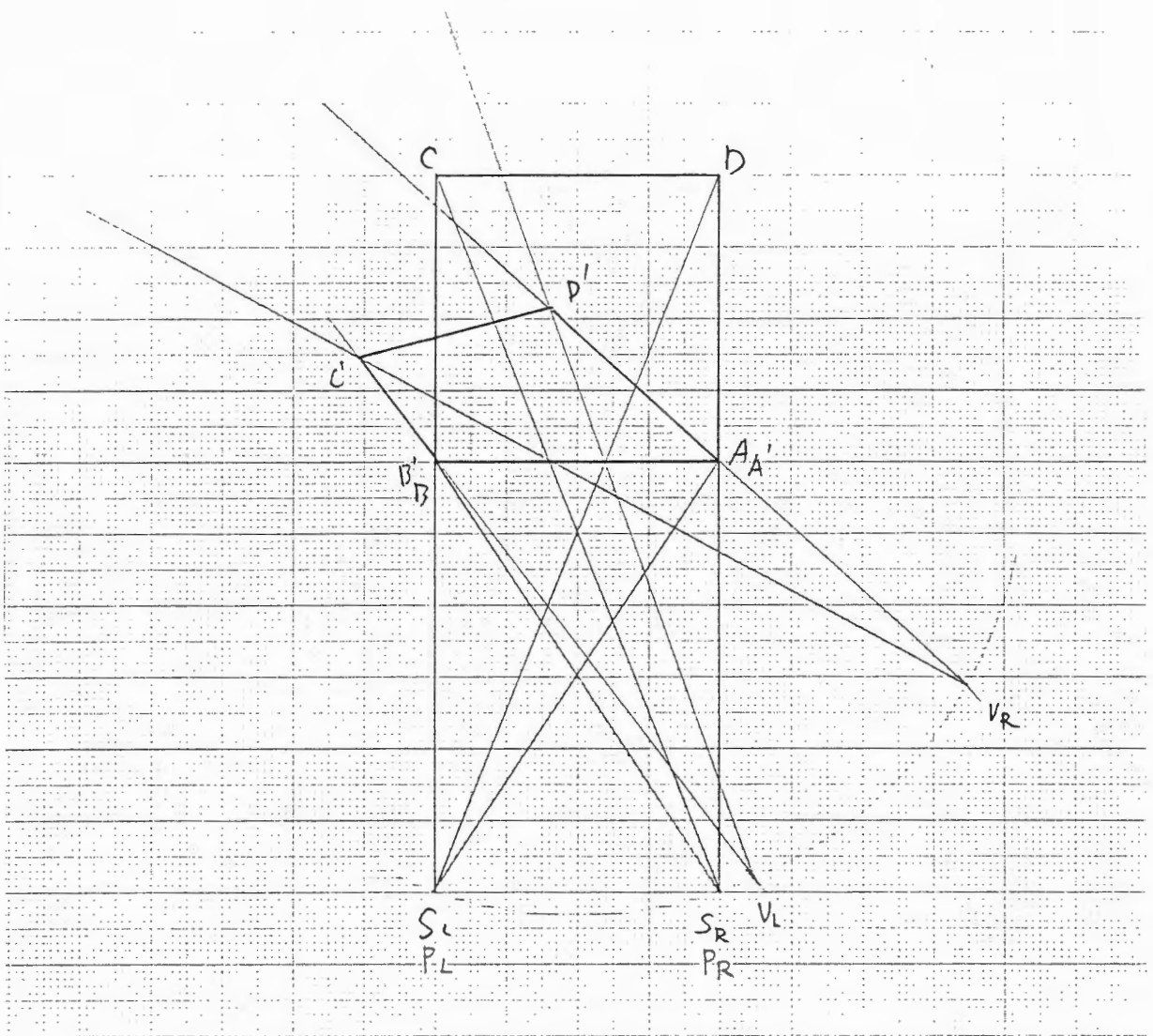


図3. 27 観察点をスクリーン中央を中心とする円弧上に移動させた場合  
 撮影点  $S_L S_R$  = 投影点  $P_L P_R$   $L_U = L_P = L_C$

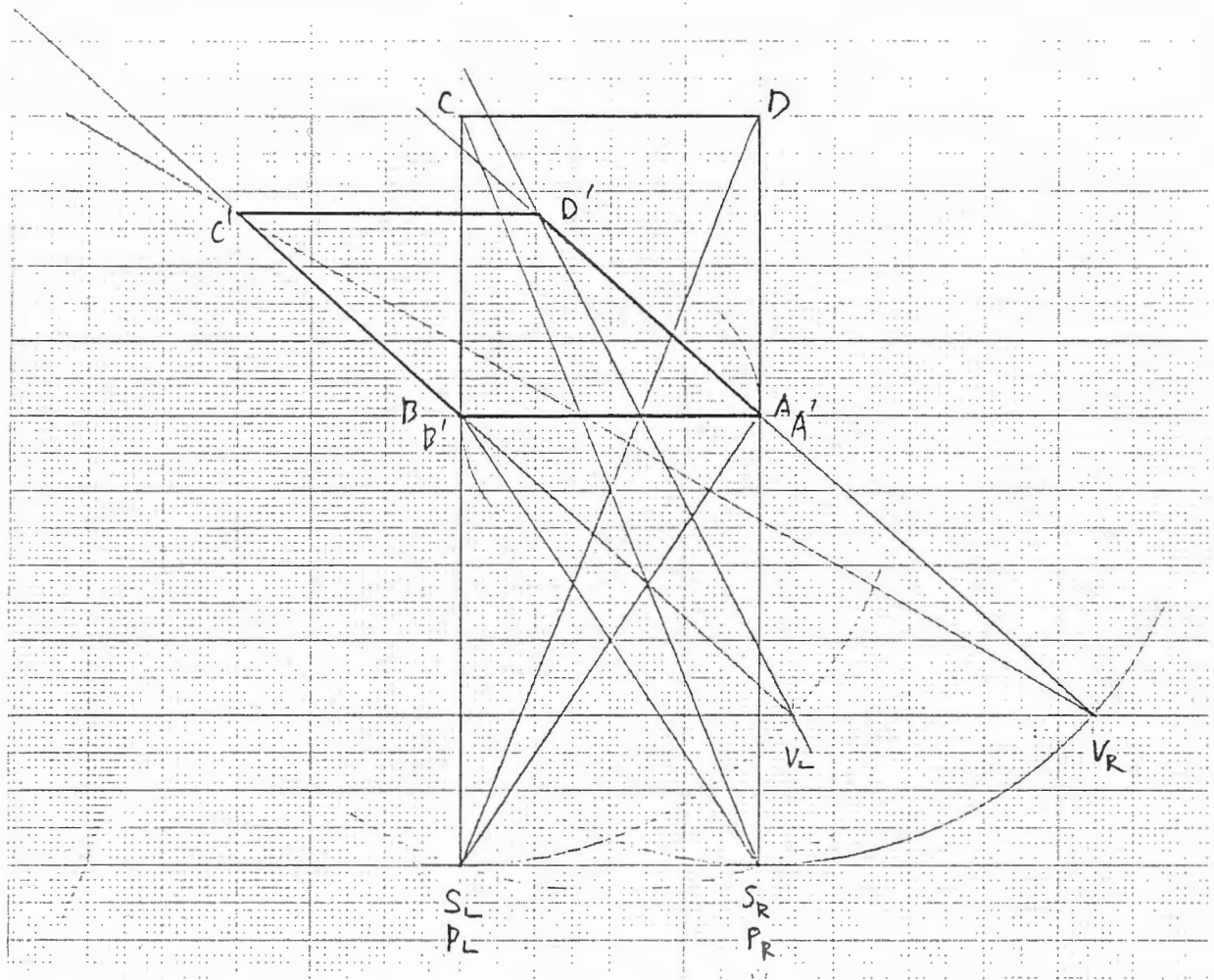


図 3. 28 観察点をスクリーンの両端をそれぞれ中心とする円弧上に移動させた場合  
 撮影点  $S_L S_R$  = 投影点  $P_L P_R$   $L_U = L_P = L_C$

表1 臨場感通信のイメージ（その1）

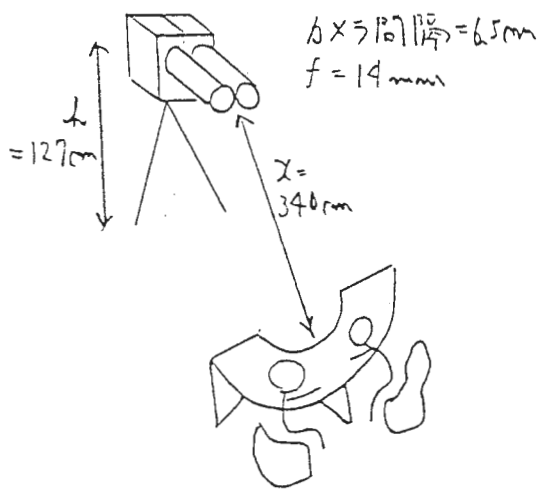
臨場感通信のイメージ		
項目	サービス	内容
会議	仮想会議	<ul style="list-style-type: none"> <li>・あたかも会議場に居るが如く出席者の様子、会議場の雰囲気伝わる</li> <li>・見たいところから見れる</li> <li>・視線の方向が分かる、視線の一致が出来る</li> <li>・仮想の会議室で会議を行う。</li> <li>・会議出席者のCG化、背景のCG化、合成</li> </ul>
イメージ クリエイター	建築	<ul style="list-style-type: none"> <li>・3次元モデルの入力</li> <li>・3次元画像でデザインの映像化を図る</li> <li>・景観、環境変化等の3Dシミュレーション</li> <li>・システム機能の3Dシミュレーション</li> <li>・コストシミュレーション</li> <li>・シミュレーション結果に基づく3Dモデルから施工の自動化を図る</li> </ul>
	自動車 航空機	<ul style="list-style-type: none"> <li>・3次元モデルの入力</li> <li>・3次元画像でデザインの映像化を図る</li> <li>・システム機能の3Dシミュレーション</li> <li>・コストシミュレーション</li> <li>・シミュレーション結果に基づく3Dモデルから製品化を図る</li> </ul>
	医療	<ul style="list-style-type: none"> <li>・人体の3次元モデルの入力</li> <li>・人体の3Dモデル（CG）を用いて手術の3Dシミュレーションを行う</li> <li>・人体の3Dモデル（CG）を用いて成形の3Dシミュレーションを行う</li> <li>・3Dシミュレーションに基づく医療行為を行う</li> </ul>
	衣料品	<ul style="list-style-type: none"> <li>・人体の3次元モデルの入力</li> <li>・人体の3Dモデル（CG）を用いてデザインの3Dシミュレーションを行う。</li> <li>・3Dシミュレーション結果に基づく3Dモデルから製品化を図る</li> </ul>

表1 臨場感通信のイメージ（その2）

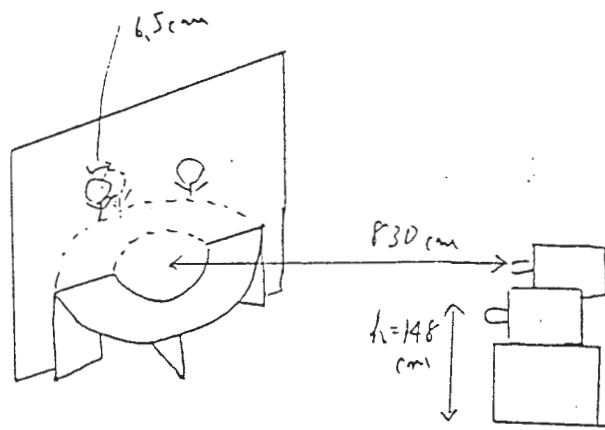
臨場感通信のイメージ		
項目	サービス	内容
模擬体験	旅行、探検	<ul style="list-style-type: none"> <li>・あたかも、月、火星、太陽、人体内、過去等を、</li> <li>（1）椅子に座ったまま、</li> <li>（2）シミュレータ（ex. 月面自動車等、触覚は、シミュレータから伝わる）で、</li> <li>（3）擬似スペースのなかを動き回って（前後左右にあるいても自分の位置は全く変わらず、単に歩いた錯覚をいただく）、</li> <li>旅行、探検、学習したような錯覚を受ける</li> </ul>
	不動産	<ul style="list-style-type: none"> <li>・物件の存在する駅周辺の環境、物件周辺の環境、物件の外観、間取り等をあたかもその場所に行つて見たと同様に観察できる</li> </ul>
	ショッピング	<ul style="list-style-type: none"> <li>・単に商品見本を3D表示する</li> <li>・あたかも売場を見て回れる</li> <li>・あたかも売り子が商品見本を示す</li> <li>・あんな柄、あんな色等とあたかも売り子に注文できる</li> <li>・自宅の擬似モデル（3D）に商品見本をCG的に合成して表示（レイアウト、マッチしてるかの判断ができる）し、adjust（大きさ、色、柄）できる</li> <li>・自分の体形、顔がうりふたつのコピーを擬似モデル（3D）と商品モデル（着物、洋服、靴、髪形等擬似モデル）をadjust（大きさ、色、柄）し、CG的に合成して表示（マッチしてるかの判断があたかも試着した時のようにできる）できる</li> <li>・商品をadjustした3Dモデルから再製品化して販売する</li> <li>・見たい位置から自由に見れる</li> </ul>

表1 臨場感通信のイメージ（その3）

臨場感通信のイメージ		
項目	サービス	内容
	講演、展示会 コンサート等	<ul style="list-style-type: none"> <li>・あたかも講演会場、展示会場、コンサート会場等に居るが如く、講演者の様子、演奏者の様子、聴衆の様子、会場の雰囲気伝わる</li> <li>・見たい位置から自由に見れる</li> </ul>
	遠隔制御・ 遠隔監視	<ul style="list-style-type: none"> <li>・3Dモデルに基づく災害進行状態のシミュレーションを行なえる</li> <li>・災害支援ロボットによって災害進行状態の監視・災害支援活動が行なえる</li> </ul>

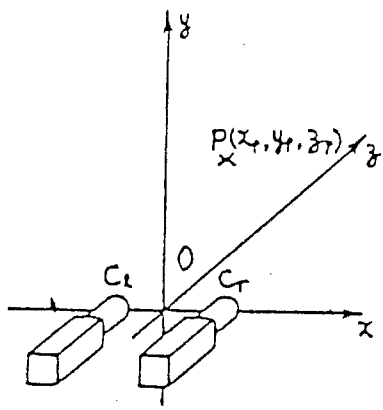


(a) 撮影側の条件

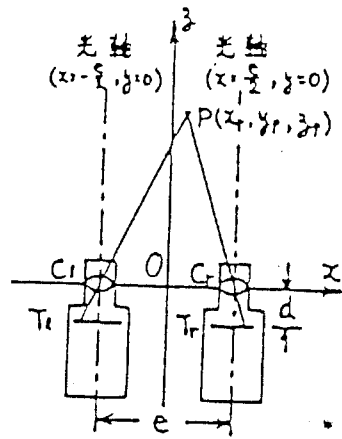


(b) 投影側の条件

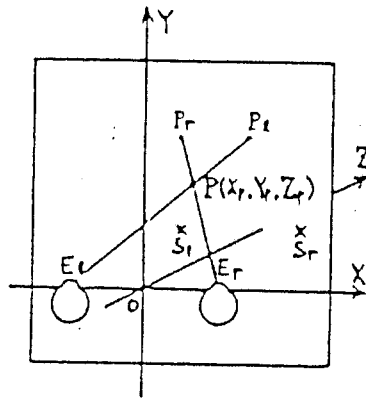
付図1 仮想会議実験系



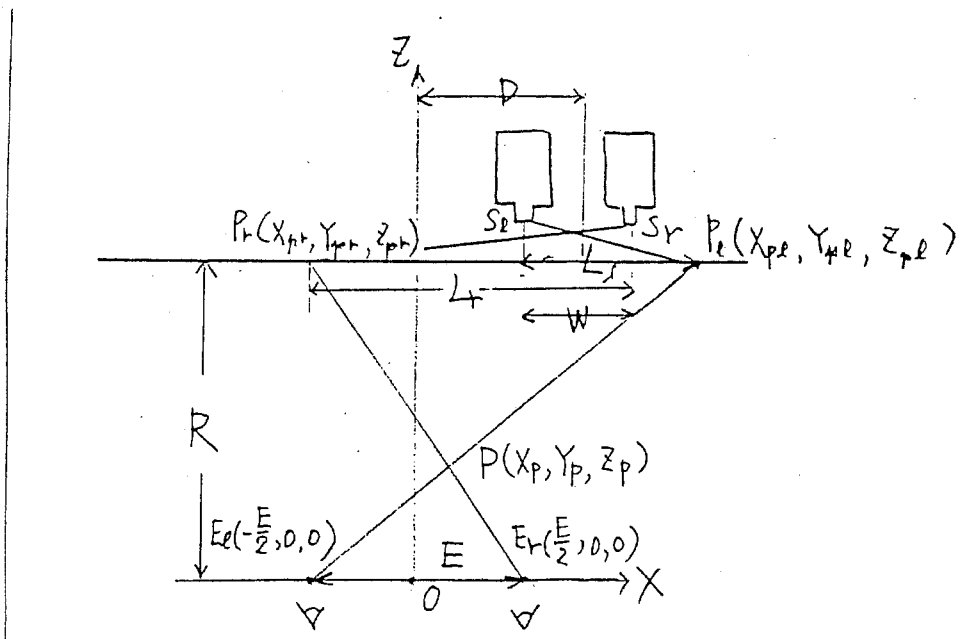
付図2 撮像系の座標軸



付図3 TVカメラのモデル

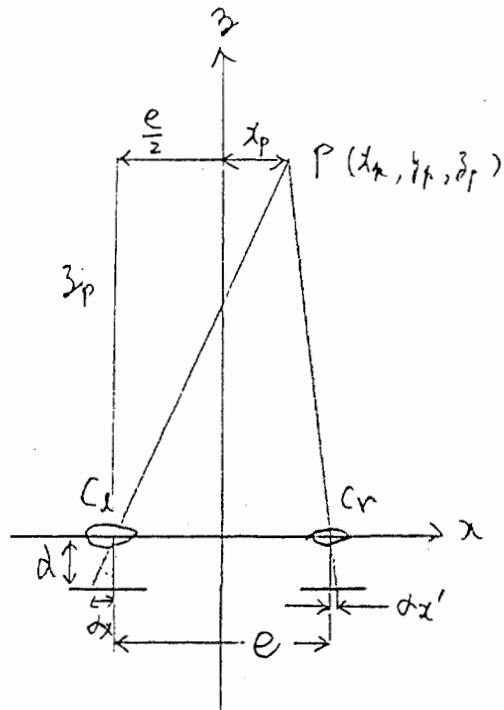


付図4 表示系の座標軸

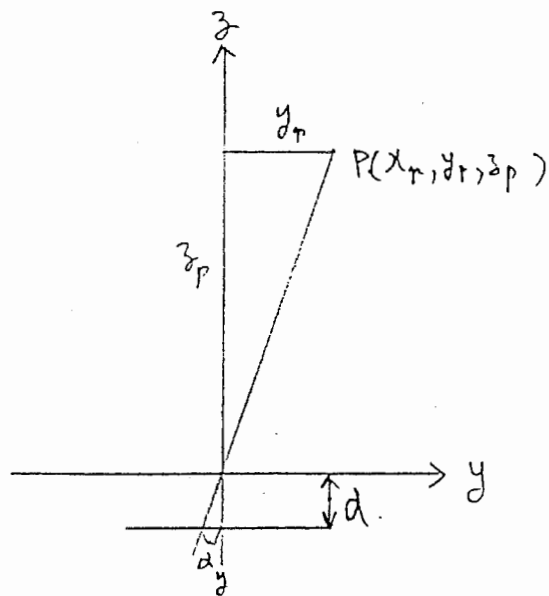


付図5 表示系のモデル





付図6 撮像系のモデル (x-z平面)



付図7 撮像系のモデル (y-z平面)