

力学モデルに基づく注釈ビューマネジメントを用いた プロジェクション型 AR システムの開発

山崎賢人^{†1} 阿倍博信^{†1}

概要：実物体に注釈情報を投影するプロジェクション型 AR は、新たな情報提示方法として注目を集めている。一方で、プロジェクタと投影対象との間に物体が存在する場合、任意の位置に注釈情報を投影できない問題がある。この問題に対して注釈情報を力学モデルに基づきレイアウトを決定する注釈ビューマネジメントを開発した。本研究では、注釈ビューマネジメントを用いたプロジェクション型 AR システムを設計、ユーザビリティ評価を行い、その結果、有用性を確認したことを報告する。

キーワード：拡張現実感、プロジェクションマッピング、ビューマネジメント、力学モデル

A Projection-based AR System by Annotating View Management Based on Force-Directed Graph

KENTO YAMAZAKI^{†1} HIRONOBU ABE^{†1}

Abstract: This paper describes design of a projection-based AR system, and usability evaluation. Projection-based AR, a technology that projects annotations on the real object in real-time, catches the attention of a new displaying method. On the other hand, projection-based AR has a problem that can't project annotations on any position when there are objects between the projector and the projection target. In this study, we proposed the annotating view management, a technology that is based on force-directed graph, decided the annotation's layout to solve this problem.

Keywords: Augmented Reality, Projection Mapping, View Management, Force-Directed Graph

1. はじめに

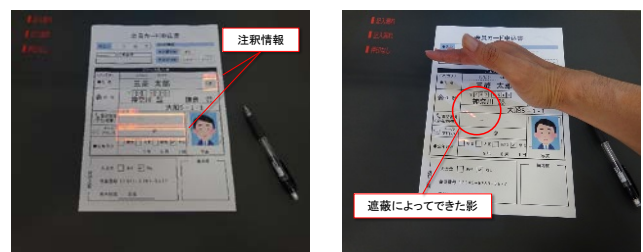
仮想空間で生成された膨大な情報を人へどう伝達するか、あるいは仮想空間と人が違和感なくコミュニケーションをとるためにはどうすればよいのかなど、人と機械をつなぐ技術であるヒューマンインタフェースに関する研究開発は活発である。その中でも、現実空間に電子的な情報（デジタルコンテンツ）を重畳描画することで、ユーザに対して直観的でわかりやすい情報を提示する技術である拡張現実感（Augmented Reality: AR）は新たな情報提示方法として広汎な分野で研究開発が行われている。

筆者らの研究グループでは、AR 技術の実用化の一環として、書類上に注釈情報を投影するプロジェクション型 AR システムを開発した。後述するように本システムの目的は書類の記入作業のサポート・ナビゲーションである。

本システムを運用・評価してみたところ、記入時のユーザの手やペンなどの位置によっては注釈情報が視認できない、といった課題があることがわかった。これは、プロジェクタと投影対象との間に物体が存在すると、プロジェクタから出た光が遮蔽されてしまうため、投影対象上の任意の位置に情報が投影できない、また情報を遮蔽している物

体（以下、遮蔽物）に投影されることが原因である。この結果、ユーザに意図した情報を知覚させられない、つまり視認性が低下する問題がある（図 1 参照）。

本研究ではプロジェクション型 AR システムにおける注釈情報の視認性を維持するために、注釈情報の管理方法技術であるビューマネジメントの提案する。具体的には、視認性の低下の原因である遮蔽によって生成された影（注釈情報を投影できない領域）に重なる注釈情報を検出し、影を避けるように配置位置を移動させるものである。このとき、注釈情報同士の距離や、所有している属性などを考慮した注釈情報のレイアウトを力学モデル（Force-Directed Graph）に基づいて定義したアルゴリズムによって決定する[1]。



(a) 遮蔽なし (b) 遮蔽あり

図 1 遮蔽による視認性の低下

Figure 1 Lowering of the visibility by the cover

^{†1} 三菱電機株式会社 情報技術総合研究所
Information Technology R&D Center, Mitsubishi Electric Corporation

2. プロジェクション型 AR システム

2.1 表示機器の選定

近年、AR 技術を活用した実用的なシステムへの需要は高まっている。現実空間に情報を付加する AR 技術は直観的な情報提示技術であるため、作業支援などへの応用に相性が良い。しかし一方で、AR システムの多くは、ユーザが手にしたタブレットや装着したヘッドマウントディスプレイ (Head Mounted Display) など、ディスプレイを通して現実空間を見ることによって、現実空間に応じて拡張された情報を知覚するものが多い。このようにディスプレイを通して AR を享受する方法をシースルー型 AR と呼ばれているが、どうしてもディスプレイが必要なことからハンドヘルドもしくはウェアラブルといったデバイスの身体的制約は避けられない。

一方、現実空間に情報を直接投影できるプロジェクション型 AR は、近年のプロジェクタの小型化・高機能化も相まって研究開発が活発化している。ユーザ 1 人に対して専用の端末が 1 機必要となるシースルー型 AR とは異なりプロジェクタは複数人が同時に映像を享受できるデバイスであるため、プロジェクション型 AR は複数人での情報共有が可能である。また可搬性は乏しいが、ユーザはタブレットや HMD のようにデバイスを身に付ける必要がないなど、従来のシースルー型 AR と比較しても、多くのメリットが存在する。

デジタルコンテンツ自体を楽しむのではなく、サポート・ナビゲーションなどが目的である作業支援分野において、ハンドヘルド・ウェアラブルなデバイスは作業の妨げになるケースが多い。こうした背景から、プロジェクション型 AR の活用が注目を集めている。例えば、鷹見らは積層造形を行う際に、施工指示を実時間で投影するプロジェクションマッピングシステムを提案している[2]。我々の研究グループでもプロジェクタを活用した AR システムの研究開発に取り組んでいる。

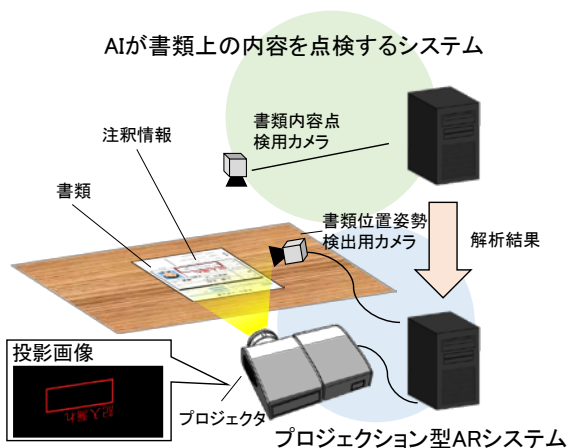


図 2 システムイメージ
Figure 2 System Image

2.2 システムの概要

文献[3]に示すとおり、三菱電機では人工知能 (Artificial Intelligence: AI) が書類上の内容を点検するシステムを開発した。本システムは、上記のシステムで解析した結果をユーザにわかりやすく表示することを目的としている。

図 2 に示すとおり、ユーザが机の上に書類を置くと、上記のシステムが AI によって書類の内容を解析・点検し、本システムに解析結果を送信する。同時に本システムのカメラではキャプチャした画像 (カメラ画像) から書類の位置姿勢を検出する。このときのカメラとプロジェクタとの幾何学的な関係は事前に既知であるため、書類上の任意の位置に書類の解析結果を注釈情報として投影可能である。

注釈情報は書類上で強調を必要とする箇所にも 2 次元の注釈 (枠・メッセージ) をマッピングするように投影する (図 3 参照)。

本システムにおいて、取り扱う座標系を図 4 に示す。カメラ画像を基に書類座標系からカメラ座標系への回転・並進成分を求めるためには、カメラ画像座標系で検出した特徴点と、それに対応する書類座標系上の点を対応付けし、PnP (Perspective-n-Point) 問題を解決する。

本システムでは、ユーザが記入にあたって書類を移動させても注釈情報がトラッキングするために、実時間で書類の位置姿勢を検出する。そこで、実時間処理を実現するために、次の 5 つのモジュールを各スレッドとして立て、並列処理するように実装した (図 5 参照)。



図 3 注釈情報の例

Figure 3 Example of annotations

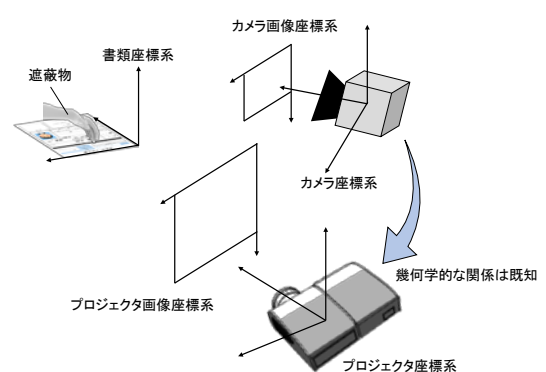


図 4 扱う座標系

Figure 4 Coordinate systems

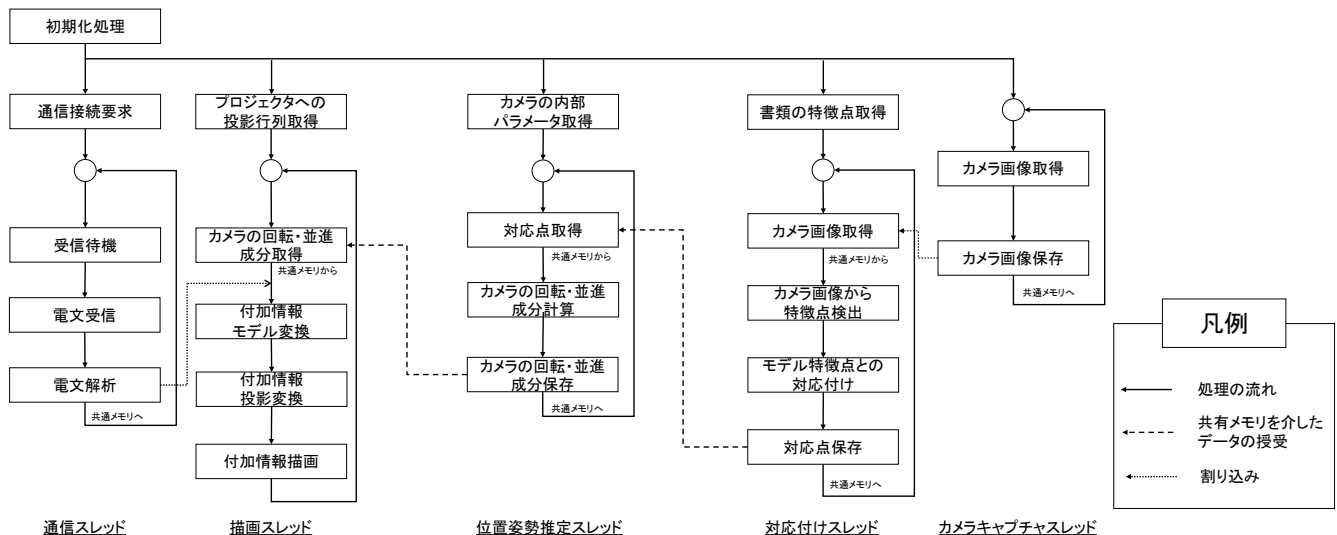


図 5 処理の流れ

Figure 5 Flowchart of the system

3. 関連研究

AR におけるデジタルコンテンツは現実空間にシームレスにあたかもそこに存在するかのように CG を重畳するものから、2 次元的にタグを付加するものまで、多種多様である。前者では、現実空間と仮想オブジェクトとの関係における幾何学的・光学的整合性を重要としている。多くの AR システムでは、これらが注目の中心である。一方、後者はユーザに対する意図理解を重要としている。ユーザに対して情報の視認性を維持するためには、幾何学的・光学的整合性とは異なる課題に取り組む必要がある。文献[4]では、この課題に対して「文脈的整合性」と定義し、この整合性を保つためには、重畳する情報を管理する技術が必要と述べ、この管理技術を総称してビューマネジメントと呼んでいる。ビューマネジメントの研究対象の多くは、任意の対象の注釈情報をどのように表示するかに着目している。例えば、建造物に対して、注釈情報を表示するナビゲーションシステムにおいて、視野内に多くの建造物があると、各注釈情報同士が重なって表示されるため、視認性が低下する。このような場合、注釈情報同士が重ならないように配置する、ユーザが注目している注釈情報のみをピックアップするなど、注釈情報の表示方法を管理・制御することで、視認性を向上させる。

天目らは環境中の 3 次元モデルを用いてユーザが注目している実物体を強調表示する手法を提案した[5]。牧田らはカメラでキャプチャした画像内の移動体（人など）や非剛体に対して表示する注釈情報の視認性を向上させるため、視認性を低下させる要因をペナルティと定義し、このペナルティを最小化するように注釈情報を配置する手法を提案した[6]。プロジェクション型 AR においては、投影対象に起因して視認性が低下する場合がある。矢引らは立体物に注釈情報を投影する際、投影対象の形状データなどから投

影に適した面に注釈情報を投影する手法を提案した[7]。このようにビューマネジメントはターゲットを絞って解決策を提案する必要がある。

4. 注釈ビューマネジメント

4.1 基本方針

1 章で述べたとおり、本システムにおいて、ユーザが書類記入時、手やペンなどの実物体がプロジェクタと投影対象である書類との間に存在した結果生じる影に起因して、注釈情報の視認性が低下する。

本システムで表示するデジタルコンテンツは注釈情報であるため、文脈的整合性を維持できればよく、ユーザに意図さえ伝われば、注釈情報の配置位置は移動しても構わない。上記の課題を解決するため、注釈情報は遮蔽を考慮して移動させる。

図 6 に示すとおり、手などの遮蔽物を検出した場合、各注釈情報が遮蔽されているかを判定する。遮蔽されていると判定された注釈情報は、視認性を維持できるように、投影位置を移動させる（図 7 参照）。このとき注釈対象上に投影されるはずだった注釈情報からは移動しているため、注釈対象と線で結び、移動を表現する。

Azuma らは注釈情報と注釈対象とを線で結ぶ方法を用いる場合、認知学の知見を基に、以下の 3 点が小さくなる注釈情報の表示についてまとめた[8]。

1. 注釈情報同士や、注釈情報と注釈対象との重なり
2. 注釈情報と注釈対象との距離
3. 描画フレーム間での注釈情報の移動量

本提案では、この 3 点を注意しつつ、注釈情報の移動位置を計算する。各注釈情報には、他の注釈情報との従属関係（親・子）など様々な属性を付加してあり、他の注釈情報との関係性を考慮しながら、全体のレイアウトを決定する。

4.2 遮蔽判定方法

プロジェクタから投影した注釈情報が遮蔽された場合、投影対象の書類に影が生じる。このような場合、投影対象を撮影したカメラから影を検出することで遮蔽された注釈

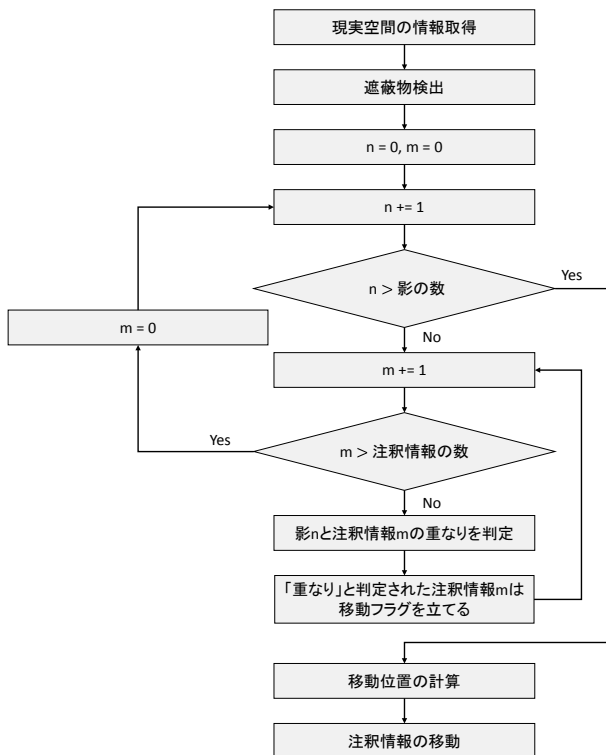


図 6 提案手法のフローチャート

Figure 6 Flowchart of the proposed method

情報を推定する[9]。しかし本研究が対象とするシーンでは、書類上に手を乗せているなど、投影対象に生じる影を検出することが困難なケースが想定される。そこで、レンジファインダを用いて遮蔽物の形状を計測し、プロジェクタ画像座標系に透視投影変換する。この透視投影された遮蔽物の凸包領域と、同様に透視投影変換した注釈情報の領域とを比較することで、注釈情報が遮蔽されているかどうかを判定する。

4.3 移動位置の計算方法

遮蔽されていると判断された注釈情報は、移動対象として、4.1で述べた3点を基に、注釈情報を移動する。この移動には力学モデルをベースとした移動モデルを定義し、これを用いて注釈情報の移動位置を決定する。

力学モデルとは、グラフをきれいに描画するためのアルゴリズムであり、各ノードに対して2種類の力（引力、斥力）を加えることで、各ノードの移動量を計算する。各ノードは他ノード距離に応じた力を受け、全ノードが受ける力が0に収束するまで移動する。その結果、全体的にきれいなレイアウトの描画を可能とするアルゴリズムである。

力学モデルはウェブサイトのハイパーリンクを可視化するなど、仮想空間におけるモノとモノの関係をわかりやすく表現するため、広範な分野で利用されている[10]。

本研究では、力学モデルを現実空間に投影する注釈情報に応用した。

本システムでは、図8に示すとおり、注釈情報や注釈対象、影をノードとみなし、各注釈情報の中心に対して、表

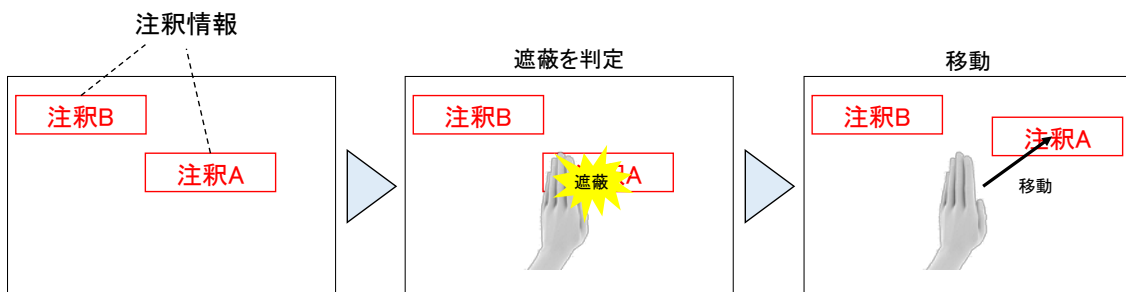


図 7 注釈情報の移動イメージ

Figure 7 Image of the moving annotation

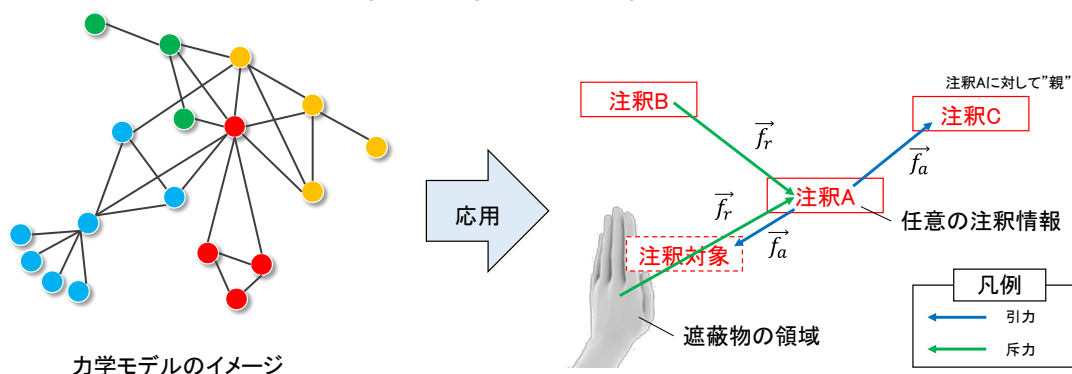


図 8 力の加え方のイメージ

Figure 8 Image of the impress the force

1 のルールに従って力を定義した．各ノードの中心から任意の注釈情報の中心へと向かうベクトルを \vec{d} としたとき，任意の注釈情報が受ける引力はフックの法則に従い(式1)，斥力は，クーロンの法則に従う(式2)．

$$\vec{f}_a = k_a \vec{d} \quad (k_a : \text{定数}) \quad (1)$$

$$\vec{f}_r = \frac{k_r \vec{d}}{|\vec{d}|^2} \quad (k_r : \text{定数}) \quad (2)$$

各ノードの領域は均一ではないため，領域が大きなノードと小さなノードの間では，少しの重なりでも斥力が大きくなるケースがある(図9参照)．そこで，各ノードの領域と各ノードの中心同士を通る直線との交点間の距離 l を考慮して斥力を再定義した(式3)．

$$\vec{f}_r = \frac{k_r l \vec{d}}{|d|^2} \quad (k_r : \text{定数}) \quad (3)$$

4.4 注釈情報の移動

4.3 で述べた方法はプロジェクタ画像座標系における注釈情報の中心座標を計算した結果であるため，プロジェクタ画像座標系で平行移動した場合，幾何学整合性が保てない．したがって，計算結果の座標値 n から書類座標系の座標値 m を求め，書類座標系において注釈情報を移動させてから，再投影する．

プロジェクタは，ピンホールカメラモデルであるため，焦点距離を (f_x, f_y) ，主点を点 (c_x, c_y) ，プロジェクタの内部

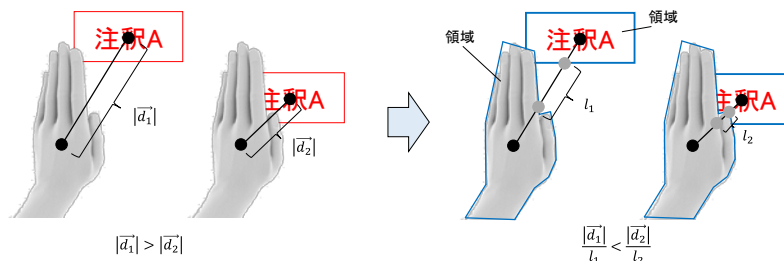


図9 斥力の再定義

Figure 9 Redefine the repulsion

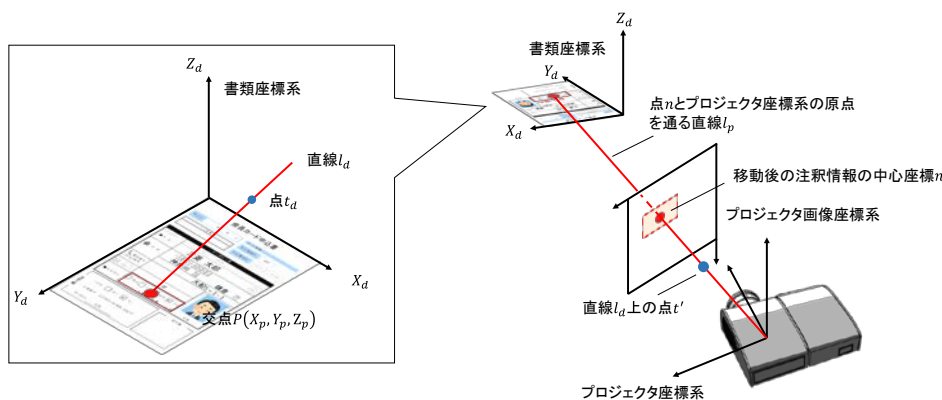


図10 注釈情報の移動方法

Figure 10 Moving the annotation method

パラメータを A_{pro} としたとき，プロジェクタ画像座標系における任意の点 (u_p, v_p) に対応するプロジェクタ座標系の点は原点と点 t を通過する直線 l_t 上に存在する(式4, 式5)．

$$A_{pro} = \begin{pmatrix} f_x & 0 & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (4)$$

$$t = \left(\frac{u_p - c_x}{f_x}, \frac{v_p - c_y}{f_y}, 1 \right) \quad (5)$$

点 n と式5から求めた点 t' と，プロジェクタ座標系の原点を通過する直線を l_p とおく．プロジェクタ座標系上の直線 l_p と点 t' を，書類座標系上の直線 l_d と点 t_d に変換した．本システムの注釈情報は， $Z_d = 0$ の $X_d Y_d$ 平面に限定していることから，直線 l_d と $Z_d = 0$ の $X_d Y_d$ 平面との交点 P の座標値 (X_p, Y_p, Z_p) は移動後の注釈情報の中心の座標値 m である．

直線 l_d の傾きの方向ベクトルを (X_l, Y_l, Z_l) とし，点 t_d の座標値を (x_d, y_d, z_d) としたとき，式6が成り立つ(図10参照)．

$$\begin{cases} X_p = \frac{-X_l \times z_d}{Z_l} + x_d \\ Y_p = \frac{-Y_l \times z_d}{Z_l} + y_d \\ Z_p = 0 \end{cases} \quad (6)$$

表1 力の種類

Table 1 Force type

引力	注釈対象，親属性の注釈情報
斥力	影，他の注釈情報

5. 評価実験と考察

5.1 評価方法

評価方法は、まず開発したシステムが実時間で動作するかを確認する。目標値はフレームレート15fps以上とする。動作確認方法は図4で示したスレッドの内3つのスレッド（描画スレッド、位置姿勢推定スレッド、対応付けスレッド）のフレームレートが15fps以上であるかを確認するため、各スレッドから任意の300フレームを抜き出し、平均フレームレートを計測した。

次に実時間性が確保できたシステムに提案した注釈ビューマネジメント機能を追加し、ユーザビリティ評価を行った。

評価方法は、注釈ビューマネジメント機能によって注釈情報の視認性が向上したかを被験者8名に対するアンケートで実施した。被験者は無作為に抽出した20代から50代の男性である。

被験者には、注釈情報が遮蔽されるように、投影対象に手を乗せるように指示した。実験後、被験者は5パターンの視認性について5段階で評価した。

実施項目は、表2に示す5パターンで行った。パターン1は図11(a)に示すとおり、注釈情報の数が1つである。手によって注釈情報を遮蔽した場合、パターン1-1は提案手法を適用していないため、移動しないが、パターン1-2は提案手法によって注釈情報が移動する。図11(b)に示すパターン2もパターン1と同様に、パターン2-1は提案手法なし、パターン2-2は提案手法ありとした。さらにパターン2-3は注釈情報に親子の従属関係を付加したものである。パターン2-3はパターン2-2と比較して、注釈情報A(子)

表2 評価内容

Table 2 Content of experiment

パターン	注釈情報の数	提案手法の有無
1-1	1つ	なし
1-2		あり
2-1	複数	なし
2-2		あり(親子属性なし)
2-3		あり(親子属性あり)



(a) パターン 1

が注釈情報 B (親) に引き寄せられていることがわかる。

5.2 実験機器

本評価実験で使用した PC の仕様は表 3 に示す。また使用したカメラは Basler 社製カメラ acA4600-10uc (キャプチャ画像の解像度 1280pixel×720pixel)、プロジェクタは EPSON 社製 EB-1761W (解像度: WXGA) を使用した。

ユーザビリティ評価の実験では、遮蔽物を手に限定して行った。したがって注釈ビューマネジメントで必要となる手の検出には、Leap Motion 社製のモーションキャプチャ Leap Motion を使用した[11]。

Leap Motion で検出した手の 3 次元座標値は Leap Motion 座標系での取得となるため、事前に Leap Motion とプロジェクタとの幾何学的な関係は計測しておく。

5.3 評価結果と考察

【実時間性の確認】

表 4 に示すとおり全てのスレッドにおいて目標を達成したため、本システムは実時間性が確保できた。

【ユーザビリティ評価】

ユーザビリティ評価の結果は図 12 に示すとおり、パターン 1, 2 とともに、提案手法によって視認性が向上したため、有用性が示せた。

パターン 1 においては、注釈情報が遮蔽された場合、視

表 3 PC の仕様

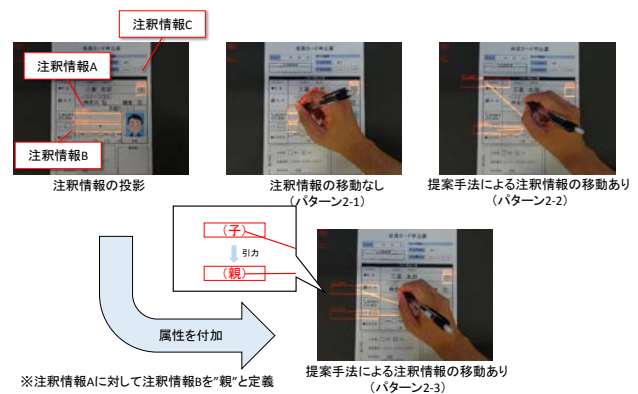
Table 3 Specification of the PC

OS	Windows 7 Professional 64bit
CPU	Intel Xeon CPU E5-1620 v3@5.5GHz
メモリ	1684MB RAM
GPU	NVIDIA Quadro K4200

表 4 計測結果

Table 4 Metering result

描画スレッド	49.70fps
位置姿勢推定スレッド	23.76fps
対応付けスレッド	15.48fps



(2) パターン 2

図 11 評価に用いた注釈情報のパターンの例

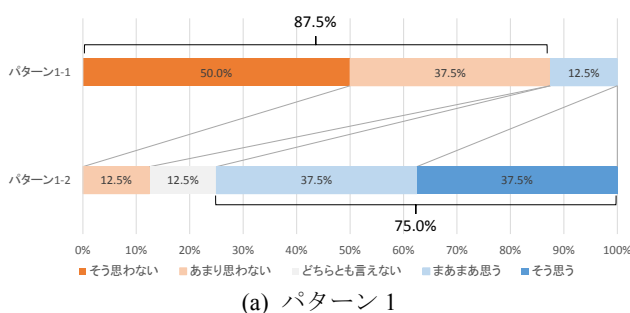
Figure 11 Example of annotation patterns of the evaluation experiment

認性が悪い(「そう思わない」「あまり思わない」と回答した人が87.5%, 良い(「そう思う」「まあまあ思う」と回答した人は12.5%であったが, 本提案手法を用いることで, 悪いと回答した人は12.5%まで減少し, 良いと回答した人は75.0%に増加した. したがって本提案によって視認性は大幅な改善が見られた. パターン2においても同様に, パターン2-1とパターン2-2を比較して, 悪いと回答した人は87.5%から12.5%まで減少し, 良いと回答した人は, 12.5%から50.0%に増加している. また, 属性を付加した場合, パターン2-1と比較して, 良いと回答した人は, 12.5%から87.5%まで増加し, 悪いと回答した人は0%になった. パターン2-2とパターン2-3を比較しても, 視認性が向上していることがわかった. またパターン2-2では「どちらとも言えない」が37.5%と全パターンの中で最も多いため, 注釈情報が分散するため注意が散漫になり視認性が悪いことがわかった. したがって, 関連した注釈情報は, ある程度まとまったグループとして移動したほうがわかりやすいと考えられる.

提案では, 実時間で注釈情報に与える力を計算しているため, 手の検出誤差などによって, 注釈情報が微動する. 被験者からは, この動きが気になるといった意見もあった. これは4.1で述べた注意点3に合致しないため, 注釈情報に対して時間方向の重み付けをする必要がある. また本提案は, プロジェクタから出た光が投影対象に届くまでに遮蔽されているかどうかのみに着目しているため, 被験者の視線と投影対象が遮蔽されても, 注釈情報が移動しない. そのため, 手の置き方によっては投影対象に注釈情報が投影されているが, 被験者に注釈情報が知覚できないケースがあった.

6. おわりに

プロジェクション型ARシステムの実用化に向けて, 様々な取り組みが行われている. しかし試作し, 運用してみると思ったような成果が得られてないことも多い. 実際, 実用水準に達するためには, 試作システムを構築・運用し, そこから得られた知見や課題を基に試行錯誤していくことが求められている.



本稿では, プロジェクション型ARシステムを開発し, そのシステムを運用して気付いた課題に対し, 注釈ビューマネジメントを提案したことについて述べた. また提案した注釈ビューマネジメントを評価実験によって有用性を確認した. 本提案では課題解決の第1段として力学モデルをベースにシンプルなモデルで注釈情報のレイアウトを決定し, 遮蔽によって生じる視認性の低下に対策を講じた.

今後は, 評価実験で得られた知見を基に, ユーザの視線を考慮した注釈ビューマネジメントを提案するなど, 視認性の向上を追求する.

参考文献

- [1] T. Fruchterman and E. Reingold: Graph drawing by force-directed placement, Software: practice and experience, Vol. 21, No. 11, pp. 1129 - 1164, 1991.
- [2] 鷹見, 吉田, 小淵, 五十嵐: プロジェクションマッピングを用いた建設用3D積層造形技術, 第22回インタラクティブシステムとソフトウェアに関するワークショップ, 2014.
- [3] 渡邊, 島, 岡田, 山本, 白木: AIを活用したバックオフィス効率化, 三菱電機技報, Vol. 91, No. 8, pp. 2 - 6, 2017.
- [4] 蔵田, 酒田, 牧田: 拡張現実感 (AR) : 11. 展望3: ARのインタフェース, 情報処理, Vol.5, No.4, pp. 425 - 430, 2010.
- [5] 天目, 神原, 横矢: ウェアラブル拡張現実感システムのための注目オブジェクトへの直感的な注釈定時手法, 日本VR学会論文誌, Vol. 10, No. 3, 2005.
- [6] 牧田, 神原, 横矢: ネットワーク型ウェアラブルARのための動的環境における注釈のビューマネジメント, 日本VR学会論文誌, Vol. 15, No. 4, pp. 603 - 613, 2010.
- [7] 矢引, 岩井, 佐藤: 投影型複合現実感における投影文字の可読性を考慮した重畳アノテーションの適応レイアウト, 情報処理学会研究報告, Vol.2011-CVIM-175, No. 382, pp. 13 - 16, 2011.
- [8] R. Azuma and C. Furmanski: Evaluating label placement for augmented reality view management, Proc. 2nd Int'l Symp. On Mixed and Augmented Reality, pp. 66- 75, 2003.
- [9] 金成, 向川, 太田: SpaceRelighter: プロジェクタを用いた実証環境再現システムにおける動的な影の除去, 画像の認識・理解シンポジウム (MIRU2005), pp. 1517 - 1522, 2005.
- [10] 土井, 伊藤: 力学モデルを用いた階層型グラフデータ画像配置手法の改良手法とウェブサイト視覚化への応用, 芸術科学会論文誌, Vol. 3, No. 4, pp. 250 - 263, 2004.
- [11] Leap Motion : <https://www.leapmotion.com/>

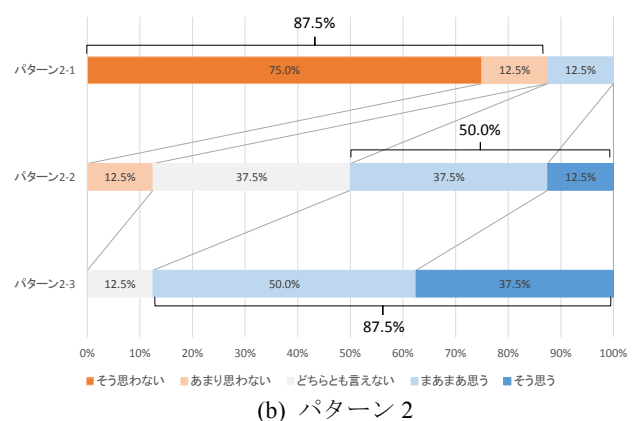


図 12 評価結果

Figure 12 Evaluation result