

令和 2 年 6 月 23 日現在

機関番号：14701

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2017～2019

課題番号：17K00271

研究課題名（和文）光源環境の整合性を維持する拡張現実型臨場感通信手法

研究課題名（英文）An augmented reality type realistic communication method to maintain consistency of the light source environment

研究代表者

床井 浩平（TOKOI, KOHE）

和歌山大学・システム工学部・准教授

研究者番号：70188746

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,000,000円

研究成果の概要（和文）：この研究課題では、遠隔地の光源環境や、その場所の周囲にあるものの形を計測し、ネットワークを介して別の場所に伝送して、別の場所にいる観測者の周りに遠くの場所のものが置かれているように見せる手法について研究した。この手法は伝送された遠隔地のものの見かけから、それを照明している遠隔地の光源環境の影響を取り去り、観測者の光源環境に置き換えることによって、遠隔地のものが観測者のいる場所に置かれているように見せかけようとするものである。これにより、遠く離れた場所にあるものを観測者の机の上にあるような感覚で調査したり、遠く離れた場所にいる人が自分と同じ部屋にいるように見せかけることができる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

災害現場や宇宙のように、人が現地に行って調査を行うことが困難だったり、非常に大きなコストがかかったりするような場合に、人の代わりにロボットを用いることが考えられている。この場合、離れたところにいる観測者は現地の経験を持たない場合が多く、ロボットが目にする現地の状況をそのまま観測者に伝達しても、観測者の環境下での知識や経験をもとに評価することが難しい。この研究は、そういう現場の状況を観測者の環境下に置いて観察できる手段を提供する。これは離れたところにいる人を、画面の中ではなく、自分と同じ空間にいるという存在感の伝達にも応用できる。

研究成果の概要（英文）：In this research project, I studied a method of measuring the light source environment at a remote place and the shapes of objects at that place, and then transmit them to another place via a network to reproduce it, in order to make the objects at a remote place appear to be placed around the observer. This method removes the influence of the remote light source environment from the appearance of the transmitted remote object shape and replaces it with the observer light source environment. This makes it possible to investigate remote objects as if they were on the observer's desk, or to make a person in a remote place appear to be in the same room as myself.

研究分野：コンピュータグラフィックス

キーワード：バーチャルリアリティ オーギュメンテッドリアリティ テレプレゼンスタンス 再照明 全天球画像 ステレオ形状計測

様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

2012年8月のOculus Rift Development Kitの登場を契機に、低価格HMD（Head Mounted Display）を用いたVR（Virtual Reality）環境の大衆化が進み、テーマパークのアトラクションのような大規模なものだけでなく、個人レベルで仮想空間に没入するVRアプリケーションが商用ベースで一般に普及しつつある。これらのアプリケーションの中には、自律的に動作する仮想空間内をユーザが単独で体験するものだけでなく、VRChat¹⁾のように遠隔地にいる別のユーザとネットワークを介して体験を共有するソーシャルVRと呼ばれるものがある。

離れたところにいる者同士が互いの存在感（プレゼンス）を感じながらコミュニケーションを行う技術は、テレプレゼンス（TelePresence）と呼ばれる。この点でVRアプリケーションによる仮想空間を介した体験共有は、それを超える「実在感」の伝達が可能になる。館はこれをテレグジスタンス（TelExistence）と名付けた^{2),3)}。このテレグジスタンスの応用には、前述の体験共有やコミュニケーションに限らず、遠隔地の作業者に対する指示や、遠隔地の観光体験など、様々なものが想定される。これらについては移動が困難な者や赴くことが困難な場所にも道を開くことが可能であり、新しいサービスのプラットフォームとしても期待されている。

また、遠隔地に自己の分身となるロボット、いわゆるテレグジスタンスロボットを置くことにより、それを義体として人が遠隔地の現実に関与することができる。これにより災害現場や宇宙など人が直接赴くことが困難な場所での作業や、離れたところにいる者同士の共同作業など、現場の環境や所在に依存しない作業環境を構築することができる。

このようにテレグジスタンス技術には多様な応用が期待されるが、その実現においては離れたところにいる両者の体験の整合性の維持が重要な課題となる。このうち視覚の統合、すなわち一方の視野のもう一方の置かれている現実との合成の際に、両者の光源環境に不整合があれば相互の実在感を損なってしまう。したがって、実在感の伝達においては、両者の光源環境の整合性を維持することが求められる。

2. 研究の目的

本研究課題は、送信側の被写体を受信側の現実の環境に合成して表示する拡張現実型の臨場感通信において、被写体の光源環境を受信側のものと置き換えて、送信側と受信側の光源環境の不整合による違和感を低減する手法を開発することを目的とした。

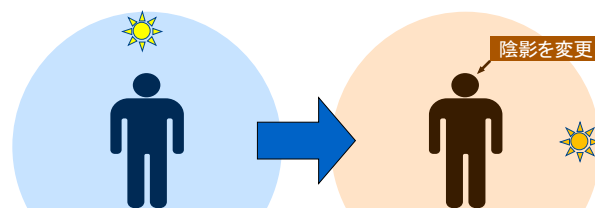


図 1 光源環境の置き換え

そのために、送信側において取得した被写体の映像と深度情報、および光源環境から、被写体表面の反射能をリアルタイムに推定する手法と、この反射能と被写体の形状情報を受信側に伝送し、受信側の光源環境を用いて陰影を付加したのち、受信者の周囲の環境と合成して表示する手法、および、受信者の周囲の環境の深度情報を用いて、これと被写体との遮蔽関係の再現や、受信側の環境内にある物体が被写体に落とす影の表現などを行う手法の開発を行った。

3. 研究の方法

図 2 に実験遠隔操作型代理科学者（Experimental Remote-controlled Scientist Agent, ERSA）⁴⁾ と呼ぶ、送信側のテレグジスタンスロボットの作業空間を示す。近景は被写体（ERSA の調査対象）であり、ERSA の到達範囲およびその周辺とする。遠景は ERSA の到達範囲外であり直接の調査対象とはならないが、操縦者と共有する ERSA の視界の背景と近景の光源環境に用いる。

光源環境の整合性を維持するために、ERSA の近景からその光源環境による照明の影響を除去して、それを操縦者側の光源環境に置き換える。この処理を再照明 (relighting) という。本研究課題では、これに3次元形状の計測にもとづく手法を用いた。これは ERSA の作業を操縦者側でシミュレーションするために近景の3次元形状を取得していること、および遠景を再照明のための光源環境として利用できることによる。

(1) 近景の取得

近景の取得にはカラー画像と深度 (距離) 画像を同時取得可能な RGB-D カメラを使用した。この RGB-D カメラは不可視領域を減じるために複数台使用し、取得データを融合して被写体の形状を再構成する。

(2) 遠景の取得

遠景は2台の全方位カメラ (全天球カメラ) を用いて取得する。2台の全方位カメラは垂直に配置し、下段のカメラで背景映像・光源環境を取得する。上段のカメラは下段のカメラ映像とのステレオマッチングにより背景映像に対する輻輳角を取得し、背景部隊までの距離を推定する。

(3) 再照明

ERSA の置かれた環境下にある被写体を操縦者が地上における経験を背景にして観測を行うために、対象物体の観測データから ERSA 側の光源環境の影響を削除し、それを地上の光源環境で置き換える。本研究課題では以下に述べる単純な再照明手法により遠隔地にある対象物の反射能を推定し、対象物の操縦者の環境における見かけの再現を試みた。

① 放射照度マッピング

まず、反射能から操縦者の光源環境下における見かけの再現手法について説明する。これには動的放射照度マッピングの手法を用いる。

物体表面上の一点 \mathbf{p} における放射照度 E は、 \mathbf{p} から見える半球 Ω 上の放射輝度 $L_i(\mathbf{l})$ に入射角 θ_i の余弦を乗じたものの総和である (式 (1), 図 4)。

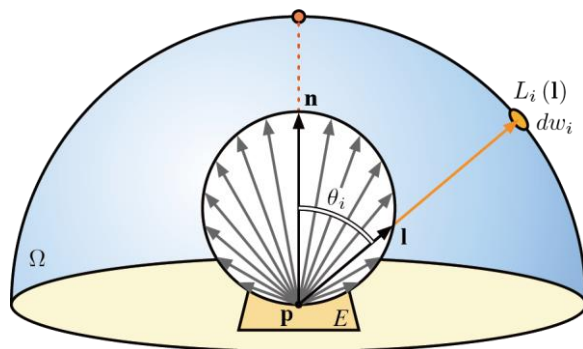


図 4 物体表面上の放射照度

$$E = \frac{1}{\pi} \int_{\Omega} L_i(\mathbf{l}) \cos \theta_i d\omega_i \quad (1)$$

そこで、半球 Ω が無限遠にあるものとして、遠景として取得した光源環境から、この放射照度 E をモンテカルロ法により求める (式 (2))。

$$E \cong \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N L_i(\mathbf{l}(\theta_i)) \quad (2)$$

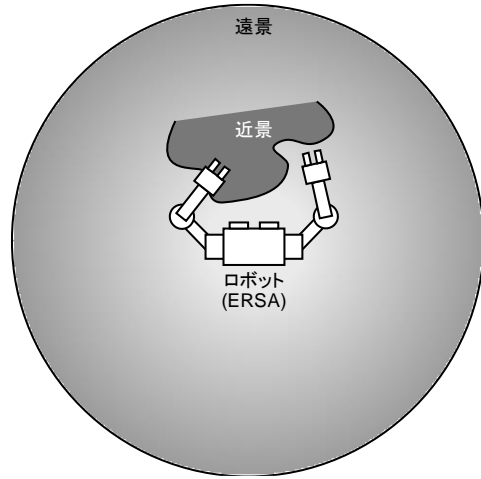


図 2 ERSA の作業空間

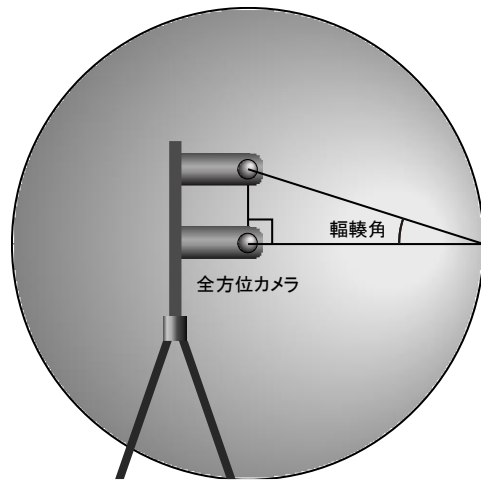


図 3 ERSA の遠景の取得

② 反射能の推定

被写体表面の反射能の推定は、前述の放射照度マッピングの手法を応用する。いま、対象物体は不透明であり自己発光を伴わないとする。この場合、 \mathbf{l} 方向から入射した光が \mathbf{v} 方向に放射される割合 (Bidirectional Reflectance Distribution Function, BRDF) を $f(\mathbf{l}, \mathbf{v})$ とするとき、半球 Ω の光源環境による \mathbf{v} 方向への放射輝度 $L_o(\mathbf{v})$ は式 (3) で求められる。

ここで対象物体の表面が完全拡散反射面であれば BRDF は拡散反射色 c_{diff} を用いて定数 $f(\mathbf{l}, \mathbf{v}) = c_{diff}/\pi$ とすることができる。また、完全拡散反射面であれば鏡面反射光は発生しないため、 c_{diff} は反射能 ρ と一致する。したがって \mathbf{v} 方向への放射輝度 $L_o(\mathbf{v})$ は、式 (2) で求めたその点の放射照度 E を用い、式 (1)(3) より式 (4) により求めることができる。

$$L_o(\mathbf{v}) = \int_{\Omega} f(\mathbf{l}, \mathbf{v}) L_i(\mathbf{l}) \cos \theta_i d\omega_i \quad (3)$$

$$L_o(\mathbf{v}) \cong \rho E \quad (4)$$

したがって、 $L_o(\mathbf{v})$ に RGB-D カメラのカラー画像を用い、深度画像から再構成した対象形状の法線ベクトルを図 4 の \mathbf{n} とし、(2) 式により求めた放射照度 E を用いて、反射能 ρ を次のように推定する。

$$\rho \cong \frac{L_o(\mathbf{v})}{E} \quad (5)$$

この反射能 ρ を操縦者側に伝送し、操縦者側の光源環境を用いて算出した放射照度 E を用いて式 (5) により放射輝度 $L_o(\mathbf{v})$ を算出すれば、再照明を行うことができる。以上の処理手順を図 5 に示す。

4. 研究成果

本研究課題では、ERSA の被写体形状や光源環境、および姿勢を、ネットワークを介して操縦者に伝送し、操縦者側で再生して操縦者が ERSA の体験を共有するシステムを開発した。このシステムは ERSA 側の HMD (Head Mounted Display) を人が装着することによって、人の体験を共有することもできる。このシステムの構成とデータの伝送の概略を図 6 に示す。

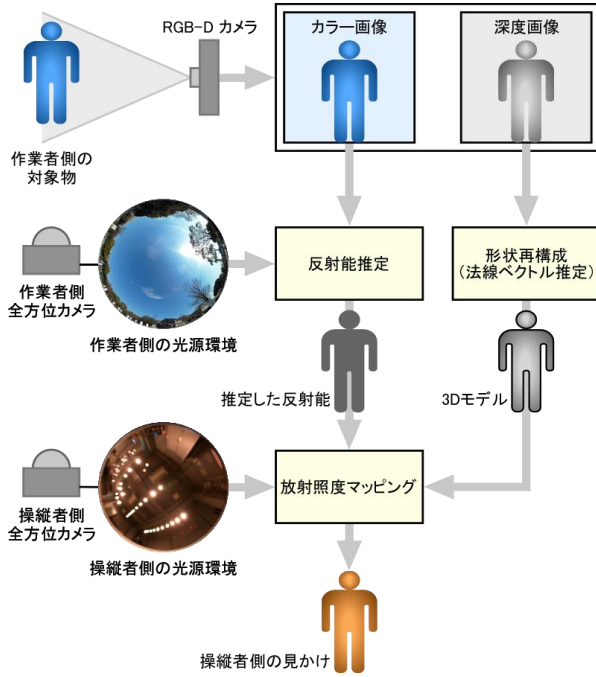


図 5 反射能の推定

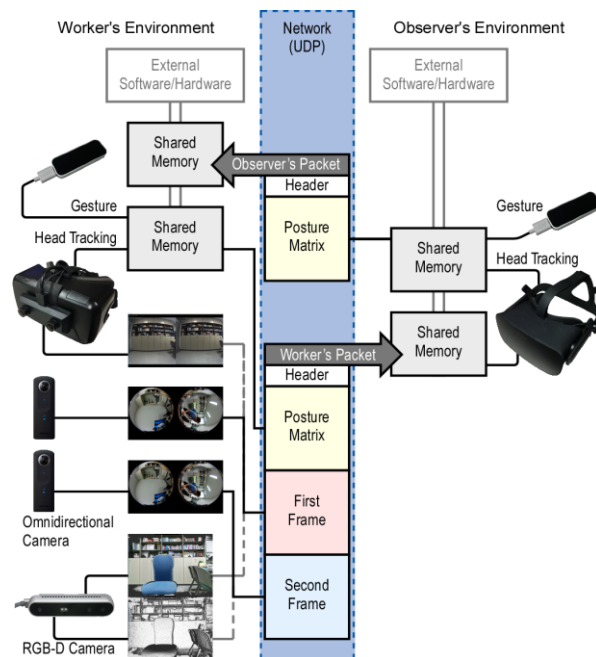


図 6 データの伝送

また、本研究課題では第3節に示した(1)の近景の取得、(2)の遠景の取得、および(3)の再照明のそれぞれの手法の開発を行った。しかし、これらの手法を前述のシステムに完全に統合することは、期間内に行うことができなかった。図7にRGB-Dカメラで取得・再構成した被写体形状に対して再照明を行った結果を示す。

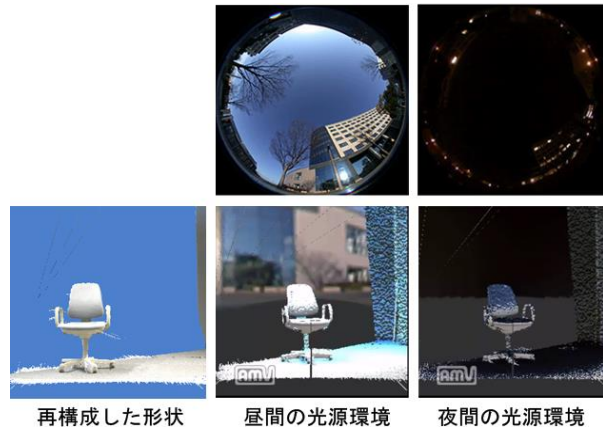


図7 再構成した形状に対する再照明

参考文献

- 1) VRChat, <https://www.vrchat.net/>
- 2) Susumu Tachi, "Telexistence," 2nd edition, World Scientific, 2014.
- 3) 館暲: "テレイグジスタンス," 日本ロボット学会誌, vol. 33, no. 4, pp. 215-221, 2015.
- 4) 河野功, 他. "月火星縦孔地下空洞探査 (UZUME) システムの研究." 宇宙科学技術連合講演会講演集 60, 6p. 2016.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計8件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 床井浩平（和歌山大学），大山英明（産総研），河野功（JAXA）
2. 発表標題 UZUME計画：環境の異なる遠隔地のテレイグジスタンスロボットの視覚の再現
3. 学会等名 第62回宇宙科学技術連合講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 早川玲央（和歌山大学），床井浩平（和歌山大学）
2. 発表標題 光源環境を反映したリアルタイム映像合成
3. 学会等名 芸術科学会 NICOGRAPH2017
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 床井浩平（和歌山大学），大山英明（産総研），岡田浩之（玉川大学），河野功（JAXA）
2. 発表標題 UZUME計画における遠隔地のロボットの光源環境の取得・伝送と再現
3. 学会等名 第61回宇宙科学技術連合後援会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 床井浩平（和歌山大学），大山英明（産総研），河野功（JAXA），岡田浩之（玉川大学）
2. 発表標題 遠隔地の作業者との体験共有のための実験システム
3. 学会等名 情報処理学会 INTERACTION2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 床井浩平（和歌山大学），大山英明（産総研），河野功（JAXA）
2. 発表標題 遠隔地のロボットと視覚を共有して操作する実験システムの開発
3. 学会等名 電子情報通信学会 PRMU CNR
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 床井浩平（和歌山大学），大山英明（産総研），河野功（JAXA）
2. 発表標題 遠隔地の視覚的環境を観測者の周囲に再現する実験システムの開発と UZUME 計画への応用
3. 学会等名 第63回宇宙科学技術連合講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 床井浩平（和歌山大学），大山英明（産総研），河野功（JAXA）
2. 発表標題 遠隔地の視覚的環境を観測者の周囲に再現する実験システムの開発
3. 学会等名 画像関連学会連合会 第6回秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 床井浩平（和歌山大学），大山英明（産総研），河野功（JAXA）
2. 発表標題 遠隔地の視覚的環境を観測者の周囲に再現する実験システムの開発と UZUME 計画への応用
3. 学会等名 月縦孔・地下空洞の探査と空洞内での基地建設に向けたロボット・アバター技術に関するワークショップ（ロボット学会2019オープンフォーラム）
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

遠隔地の視覚的環境を観測者の周囲に再現する実験システム
<https://github.com/tokoik/ted/>

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----