Robot-Supported Cooperative Work の提案

—実空間視野共有型コラボレーションシステム SCOPE を用いた遠隔作業支援—

町 野 保* 南 條 義 人* 柳 原 義 正*
河 田 博 昭* 岩 城 敏* 下 倉 健一朗*

Proposal of Robot-Supported Cooperative Work

—Remote-collaboration System based on a Shared Field of View—

Tamotsu Machino*, Yoshito Nanjo*, Yoshimasa Yanagihara*,
Hiroaki Kawata*, Satoshi Iwaki* and Ken-ichiro Shimokura*

To create a more efficient environment in which to perform remote maintenance, the authors propose a novel collaboration concept, called robot-supported cooperative work (RSCW). In RSCW a maintenance robot assists a cooperation work between an on-site human worker and another skilled human operator at a remote support center. By emphasizing the intentions of the remote supporter through robot functions that cannot be imitated by humans, RSCW can provide effective support for the on-site worker. In the present study, as the first manifestation of RSCW, featuring the projection capability of a maintenance robot, a prototype remote-collaboration system named SCOPE (sight collaboration by projection effect) was developed. This system consists of a projector unit with a camera, a multiple control unit (MCU) for video/voice communications, and PCs connected via a network. It has three key functions: creating a shared field of view between a remote supporter and an on-site worker, keeping meta-information related to objects in real space, and projecting meta-information onto the objects. The effectiveness of these functions was evaluated by experiments on two fundamental tasks—"comprehending a target object" and "transmission of instruction details"—involved in a typical maintenance operation. The experimental results show that each function is effective in shortening the time taken to perform the maintenance operation.

Key Words: Remote-Collaboration, Video/Voice Communication, Shared Field-view, Meta-information and Information Projection

1. は じ め に

スポーツ, 医療等, 様々な分野で熟練者が非熟練者に指導・支援する場面は多く, これらの支援を効率的に行うことは重要な課題である. 特に製造業分野では, 近年熟練作業者の減少が急激に進み, 点在する工場をいかに少人数の熟練者で迅速かつ効率的にメンテナンスを行うかが重要な課題となっている. そのため, ネットワークと IT 技術を利用したリモートメンテナンス環境の整備が今後ますます重要となってくる. この課題に対し, 従来から以下の 2 通りのアプローチが取られてきた.

- ・現場に派遣したロボットの自律動作および遠隔操作技術を駆使して現場作業を遂行するアプローチ [1] [2]
- ・未熟練者を現場に派遣し, 熟練者が遠隔から支援しながら

未熟練者に作業を遂行させるアプローチ [3] [4] [9]

前者に関しては, 人が立ち入ることができない極限作業領域では有効な手段と考えられるが, 現状ロボットの自律動作のレベルやネットワーク遅延の課題等を考慮すると, 現場に人を派遣して作業を遂行するレベルに達しているとはいえない. 一方, 後者に関しては, 映像通信や IT 技術を利用する試みがなされているが, 作業員がウェアラブル PC 等の情報機器を所持する必要があるだけでなく, 支援者の意図が十分に伝わらない場合があるなど, 現場作業員の身体的・精神的負担が大きいことが問題となっている.

一方, 近年のロボット技術応用は産業分野にとどまらず, 家庭やオフィスに広がりつつあり, 人間とロボットとの共生・共存を前提とした協調作業やコミュニケーション, あるいはサービスに関する研究が盛んに行われている. しかし, これらの研究では, 人とロボットとの一対一の関係に主眼を置いたものが多く, 人間同士の協調作業をサポートすることに主眼を置いた

原稿受付 2005 年 7 月 7 日

*NTT サイバーソリューション研究所

*NTT Cyber Solutions Laboratories

ものは少ない。そこで本論文では、効率的な遠隔作業支援環境の構築を目的に、人間とロボットとの役割と備えるべき機能について論じる。

以下第2章では、従来の二つのアプローチの長所・短所を比較し、人間同士の協調作業にロボットが積極的に介入してサポートするコンセプト Robot Supported Cooperative Work (RSCW) を提案する。さらに、第3章でリモートメンテナンスにおける RSCW の必須要件に対する我々の仮説を説明し、その検証システムである実空間視野共有型コラボレーションシステム SCOPE (Sight COLlaboration by Projection Effect) について述べる。第4章ではその検証実験の結果を述べ、第5章で今後の課題を考察し、第6章にて結論を述べる。

2. Robot-Supported Cooperative Work

熟練作業者が現場に行けない場合、前述したように、現場の機器・ロボットを遠隔操作して対処するか、現場に作業員を派遣して、遠隔から支援しながら作業員に対処させる方法がとられる。以下、前者を遠隔操作型、後者を人間協調型と呼ぶこととする。遠隔操作型は、Fig. 1 (a) に示すように、人とロボットがネットワークを介して協調し、ロボットが外界にインタラクションする系である。人間協調型は、Fig. 1 (b) に示すように、人と人がネットワークを介して協調し、人が外界にインタラクションする系である。これらの場合、現場作業を担当するロボットや人は、それぞれ以下の長所・短所があると考えられる。

[遠隔操作型] 省力化、人件費削減の観点からは理想的であり、引き続き強化すべきアプローチである。また、パワーや高速な情報処理等、ある側面では人の能力を超える作業が可能である。しかし、現状のテレロボティクス技術では自律性・操作性のレベルが低く、熟練者が現地に赴いて遂行する作業と同等の作業の実現は困難である。そのため、その積極的な活躍の場は、原子力プラントや宇宙空間などの極限作業用途に限られる。

[人間協調型] 人間の持つ高度な判断能力による臨機応変な現場対応が可能であるが、現状のコミュニケーション技術では

十分な臨場感が共有できない。そのため、熟練者と未熟練者とのスキルの差が大きいほど、あうんの呼吸が伝わらず、支援者、被支援者ともにストレスを感じ、作業効率が著しく劣化するケースが多い。また、作業空間が広く、作業に移動が伴う場合は、遠隔地とのコミュニケーションに必要なカメラやディスプレイなどのツールの装着が身体的な負担となる場合が多い。

そこで我々は、各アプローチの長所に着目し、遠隔の熟練者と現場の未熟練者のコラボレーションを現場のロボットが支援しながら作業を遂行する形態を提案する。人間同士の協調作業をロボットがサポートすることから、グループウェアをはじめとするネットワーク上の共同作業をコンピュータにより支援することを目指した CSCW (Computer Supported Cooperative Work) になぞらえて、RSCW (Robot-Supported Cooperative Work) と呼ぶこととする。Fig. 1 (c) に示すように、人が真似できないロボットの機能を外界に向けてのみではなく、遠隔支援者と現場作業員とのインタラクションにも積極的に利用することでより効率的な支援を行う系である。

現場作業員を遠隔から支援する場合にロボットを用いる例として、葛岡らの GestureMan [5] や三河らの C-term [6] がある。これらは支援者と現場作業員の間に何らかの機構を有するロボットを介在させ、支援者と現場作業員の円滑なコミュニケーションの実現を目指しており、基本的な研究の目的は同じである。しかし、これらは人間同士のコミュニケーション観察に基づき、人の挙動を現場ロボットに再現させることで円滑なコミュニケーションを実現するアプローチをとっており、人が真似できないロボットの機能を積極的に利用していない。

一方、渡辺らの InterRobot [7] や、平岩らの分身インタフェース [8] のように遠隔作業支援以外の分野でもロボットを介して遠隔地間の円滑なコミュニケーションを実現する試みがなされているが、これらも人の挙動をロボットで再現する点に主眼が置かれている点が我々と異なる。

3. 実空間視野共有型コラボレーションシステム SCOPE

3.1 RSCW においてロボットに求められる機能 (仮説)

ロボットに求められる人間の能力を超える機能としては、パワーアシストのような力学的なサポート機能や、高度情報処理などの知的サポート機能など、様々な機能が考えられる。これらの機能は、対象とする作業に応じて取捨選択されるべきである。本論文では、リモートメンテナンス作業を対象とし、RSCW を実現するに当たり、遠隔地の支援者の意図を現場作業員に的確に伝えることに主眼を置くこととする。我々はこれまでに、多地点音声画像通信をベースとした人間協調型の遠隔支援システム Field-AID を開発してきた [3]。そこで、Field-AID による遠隔協調作業実験より、現状の音声画像通信を用いたコラボレーションの問題点を以下のように整理した。

(A) 支援者の指示対象が、作業員の視野範囲にあるかどうか不明瞭、あるいは視野範囲内のどれかが不明瞭。

(B) 支援者が提示する情報と現場側対象物との関連性が不明瞭。

(C) 作業員が機器 (Head Mounted Display やウェアラブル PC) を装着する負担が大きい。

Fig. 1 Set ups for remote maintenance

これらの問題点のうち、(A)、(B)を解決するためには、次に示す実空間情報提示機能が特に効果的であるという仮説を立てた。

(1) 視野共有機能：遠隔にいる者同士に、視野範囲を知覚（同期）させ対象を共有する。

(2) インデキシング機能：遠隔地から現場実空間の物体あるいは特定位置に情報を関連付ける。

(3) 情報の重畳提示機能：実空間に情報を直接提示し、それを実空間内で選択操作可能とする。

Fig. 2 は、これらの機能のイメージ図である。遠隔の支援者がカメラを介して見ている視野範囲をスポットライトのように提示し、現場作業員が知覚できるようにしている。さらに、その視野に存在する物体に様々な情報を関連付けて投影することで、遠隔の支援者の意図を現場作業員に伝えることができる。これらは、実空間上に画像や情報を投影するという人間には真似できない機能により実現できる。

上記機能の実現には、MR (Mixed Reality) や AR (Augmented Reality) の分野で利用される HMD (Head Mounted Display) を用いて、遠隔支援者の見ているカメラ視野や対象物に関連した情報を対象物に重畳しているように提示する方法が考えられる。しかし、現状の HMD を用いる手法では課題 (C) を解決できない。そこで、プロジェクタを用いる手法が有効と考えられる。ただし、実世界の作業においては、作業領域が空間的に固定であるとは限らないため、固定配置したプロジェクタでは不十分である。そこで、プロジェクタとカメラを搭載したロボットに実空間上に移動させることにより、作業員に情報機器等を装着させないだけでなく、作業領域の空間的な制限をなくすことが期待できる。プロジェクタを搭載した移動ロボットが、遠隔の支援者の意図を共有視野上に投影することにより音声のみの伝達を補強し、現場作業員をサポートしている様子を Fig. 3 に示す。

3.2 仮説検証システム

3.2.1 システム構成

上記の仮説を検証するために、実空間視野共有型コラボレーションシステム SCOPE を構築した。Fig. 4 に SCOPE のシステム構成を示す。

ネットワーク上に多地点音声画像通信サーバを置き、現場側

Fig. 2 Image of remote support to provide a shared field of view in real space

と支援側にそれぞれクライアント PC を配置する。これにより、支援者は現場のカメラ画像を見ながら音声により支援することができる。音声画像通信部には、Meeting Plaza (NTT-IT 社製) を利用している。なお、画像通信サーバは後述の属性情報を管理する DB サーバとしても機能する。

現場側では、カメラとプロジェクタを一体化し、垂直軸回転するステッピングモータに搭載して、カメラ視野および投影範囲の遠隔操作を可能としている。後述する視野共有機能を実現するため、カメラ視野範囲とプロジェクタ投影範囲とは一致するように調整されている。なお、本論文では、実空間情報提示機能の検証に重点をおき、ロボットの自由度は上記の 1 自由度のみとした。

作業員はウェアラブル PC 等を装着しない場合、作業中にクライアント PC を操作することは難しい。そこで、入力インタフェースとしてレーザポインタを作業員に持たせ、レーザスポットを画像認識処理することで、クライアント PC のマウスに相当する操作機能を試行的に実装した。Fig. 5 に、レーザ光の位置検出と PC におけるマウスクリックに相当するクリック検出のフローチャートを示す。Fig. 5 (a) は、レーザでポインティングされた位置を検出するフローである。まず、カメラ取得画像の全画素において前フレームとの差分をとり、その差が閾値 D_{th} 以上である画素数 N を算出する。次に、前フレームとの差分において R (赤) 成分における差分 DR が最大の画素 P を算出する。そして、前フレームとの差分が検出された画素数 N が閾値 N_{th} 以下で、かつ DR が閾値 DR_{th} 以上の場合、画素 P をレーザにより照射された点と見なす。一方、Fig. 5 (b) は、クリック

Fig. 3 RSCW supported by mobile robot with a projection capability

Fig. 4 Schematic configuration of SCOPE system

Fig. 5 Flowchart for laser recognition

Fig. 7 View of a support screen

Fig. 6 View of a field side

検出のフローチャートである。レーザ光が認識されている時間 T_{on} と認識されていない時間 T_{off} を設定し、それらを満たした場合にクリックしたと検出することとした。

3.2.2 視野共有機能

遠隔協同作業の際、支援者が作業者に対して音声で指示する場面は多い。対象物に対する知識が、作業者、支援者ともに共通であれば、対象物の特定や操作指示は比較的容易だが、そうでない場合、「右の方にある」等の相対的な方向を表す表現も多用される。このとき、支援者の視野範囲は作業者にとって重要な情報となる。本システムでは、カメラ視野範囲とプロジェクタ投影範囲とを一致させ、投影画像に枠を表示することで、支援者の視野範囲を作業者に示すことができる。現場側の様子を Fig. 6 に示す。

3.2.3 インデキシング機能

作業遂行に必要な情報（以下、属性情報）を作業空間内の物体の位置座標に関連付けて管理し、必要に応じて提示させることができる。本システムで扱える属性情報は、(1) テキスト、(2) 画像、(3) 映像、(4) 音声、(5) プログラム処理の 5 種類である。プログラムを属性情報と見なして扱えるようにしたことで、現場側でプログラムの実行/停止操作ができる。属性情報が関連付けられた位置には、投影オブジェクトと呼ぶ円形状の図形を目印として提示する。例えば、棚から薬品を選ぶといったシーンの場合、薬品の特性や取り扱い方法を属性情報として登録し、ピンの位置に投影オブジェクトを提示する。投影オブジェ

クトを操作することで属性情報の表示状態を操作できる。現場側では投影オブジェクトをレーザポインタで操作し、支援側では現場を映した通信画面上の投影オブジェクトをマウスで操作する。支援者側の画面を Fig. 7 に示す。属性情報の登録は、支援側の通信画面上において、GUI 操作で行える。

3.2.4 情報の重畳提示機能

本システムでは、現場側のカメラとプロジェクタを支援側から操作して、視野範囲と情報提示範囲を変更できる。その際、モータの動きと連動させてプロジェクタの投影画面を補正し、投影オブジェクトと属性情報を、実空間上で静止しているように提示することができる。この機能により、作業者が実空間の静止物体と属性情報とを直感的に関連付けて認識できる。

3.2.5 その他の機能

支援側クライアント PC の通信画面上のマウスの動きを現場側に投影することで、「指し示す」という行為が支援者が注視している点の表示を擬似的に行える。また、マウスカーソルの軌跡表示の有無をモード選択でき、軌跡を残すことで、簡単な文字や記号を実空間に遠隔から描くことができる。作業対象物を移動させるような、方向を伴う作業指示の際にも利用できる。

3.2.6 SCOPE を利用した遠隔支援

ここでは、本節で述べた SCOPE の各機能を利用した遠隔支援の手順例を説明する。支援者は、Fig. 7 に示す画面上で現場画像を見ながら、現場のカメラとプロジェクタの姿勢をキーボード操作によって制御し、現場状況を確認する。この操作に伴い、現場側では投影されている視野枠が移動するため、現場作業者は支援者がどこを見ているのかを共有しながら現場状況の説明ができる。支援が必要な作業エリアや作業対象物が視野に入ると、支援者はマウスカーソル表示を使いながら、指示や操作説明などを行う。さらに、支援者は現場画像上の指示したい位置に投影オブジェクトを作成し、図面や指示内容などの属性情報を関連付ける。投影オブジェクトは、画像ファイルやテキストファイルなどの属性情報ファイルをカメラ画像上にドラッグ・アンド・ドロップすることでも作成できる。作成した投影オブジェクトは、支援者側の現場画像上に楕円状の図形として表示されると同時に現場側でも投影される。現場作業員は、投影オブジェクトにレーザを照射して属性情報を表示させ、作業を遂行する。

4. 検証実験

4.1 視野共有機能の検証

4.1.1 目的

機器等のメンテナンス作業において遠隔にいる熟練者から指示を受ける場合、通常まず指示の対象となる箇所を互いに認識する「対象物の把握」を行い、その後に「指示内容の伝達」が行われる。本節では、様々な遠隔コラボレーション作業に共通して行われる「対象物把握」のフェーズを取り上げ、第3章で立てた仮説のうち、視野共有機能の効果を検証することを目的とする。そのため、SCOPEの視野共有機能を利用した遠隔指示によって、作業者が指示対象物を把握するまでに要する時間を測定し、作業効率を評価する。

4.1.2 実験方法

現場作業員1名、支援者1名が組になり、支援者からの指示に従って壁に貼られている対象物を現場作業員が見つけ出し、別の位置に貼り付ける作業を行う。対象物としてそれぞれ異なる図形を描いたカードを現場側の壁に20枚貼り、サポート側にも同じカードを用意する。支援者は、20枚の中から任意に5枚を選択し、順次作業員に同じカードを選ばせる指示を行う。図形は任意の自由曲線で囲まれた図形とした。Table 1に示すように4種類の実験条件を設定した。条件1, 2は、SCOPEの視野共有機能を用いて対象物を指示する場合である。条件1はカーソル提示を利用することにより視野内の指定位置をポインティングできる。条件3は、従来の音声画像通信のみを利用して指示する場合に相当する。条件4は、電話のみで指示する場合に相当する。被験者は10組で、それぞれが全条件の実験を行った。Fig. 8に実験風景を示す。左上図は、現場側カメラで撮影した画像であり、Fig. 7で示す支援者側の画面に表示される現場画像に相当する。右上図は現場側の一体化させたカメラとプロジェクタの概観図である。前述したように、遠隔支援者側からの操作で垂直軸周りに回転させることができる。左下図は、現場側のカメラ・プロジェクタを操作しながら指示をしているサポート側の様子である。右下図は、現場の様子である。

4.1.3 実験結果と考察

指示者が指示対象物の説明を開始してから、作業者が指示対象物を指定位置に貼るまでの時間を作業時間とし、計測した作業時間の平均値と標準偏差をFig. 9に示す。なお、1枚を特定する作業時間が2分を超える場合はタイムアウトとした。タイムアウトは条件4においてのみ50回の試行中8回発生した。音声のみに比べ、映像や視野提示等の利用できる機能が増えるほど、平均作業時間が短く、ばらつきも少ない。各条件の効果を確認するため、作業中の会話内容で作業時間を分類すると、次

Table 1 Experimental conditions for verifying shared viewing field

	Voice	Image	Viewing field display	Cursor display
Condition1	Yes	Yes	Yes	Yes
Condition2	Yes	Yes	Yes	No
Condition3	Yes	Yes	No	No
Condition4	Yes	No	No	No

の三つに大別できた。

- (a) 形状等の対象物自体の特徴に関する説明に要する時間
- (b) 対象物の位置の説明に要する時間
- (c) 作業者が選択した対象物の確認に要する時間

条件1から条件3では作業時間が(b)と(c)で構成されたのに対し、条件4では(a)と(c)で構成された。これは、条件1から条件3では、支援者が現場画像を見ることができたため、形状等で説明するよりも位置で説明したほうが効率的だったためと考えられる。さらに、位置の説明においては各条件で次のような特徴があった。

条件1:「これです。」と指示した後、すぐに確認行為に移行

条件2:「今見ている中で右から3番目の…」のように、視野を共有していることを利用して視野内の位置を説明

条件3:「右の棚の方を見てください。その中で…」のように、見ている範囲を説明した後詳細な位置を説明

これらの特徴から、条件3や条件4では指示に必要な情報をすべて音声で行っているのに対し、条件2では支援者が見ている範囲の説明を、条件1では対象物の位置に関する説明をシステム側の機能で補強しているため、対象物の特定に要する時間を短縮させる効果があったと考えられる。

一方、条件4においてばらつきが大きいという結果は、音声だけでも作業時間が短い場合があることを示している。これは、任意の自由曲線で囲まれた図形が、作業者、支援者共に連想で

Fig. 8 Scenes of verification experiments

Fig. 9 experimental results on shared viewing field

きる図形（例えば県の形や動物の形）で表現できる場合であった。つまり、言葉で表現できる作業指示においては、音声のみでも十分効率よく作業が行える場合がある。このことは、遠隔協調作業において、作業員、支援者共に熟練者の場合や、共通の専門用語が通じ合う関係である場合には、音声だけでも十分な場合があることを示唆している。一方、工場内などの騒音下での作業のように音声聞き取りにくい場合や、海外とのやりとりのように言葉の壁が生じる場合には、視野共有機能の効果が発揮できると考えられる。

被験者から感想をヒアリングした結果、カメラ画像のズーム機能や広角カメラを併用したいという要望があった。支援者の現場状況把握には必須の機能と考えられる。さらに、支援者のカメラズーム操作に連動して現場側の視野枠を小さくすることで、支援者が特定箇所を注視しようとしている意図が現場作業員に伝わることも期待できるため、今後の検討課題としたい。

4.2 インデキシング・重畳提示機能の検証

4.2.1 目的

本節では、第3章で立てた仮説のうち、インデキシング機能、重畳提示機能の効果を検証することを目的とする。そのため、前節で述べた「指示内容の伝達」のフェーズを取り上げ、2種類のタスクを行う。実験1では作業内容の把握に要する時間で指示内容の伝達容易性を評価し、実験2では作業遂行に要する時間で指示内容の記憶残存性を評価する。

4.2.2 実験1（指示内容の伝達の容易性）

16枚のカードにそれぞれ異なる図形を描画したものを作業対象物として壁に貼り、それぞれのカードに異なる指示内容に対応付け。作業者は、16種類の指示内容に従って作業を行う。Fig. 10に示すように指示内容は、4×4のマトリクス上の指定位置への移動とし、作業者への提示方法のみが異なるように以下の2通りで関連付けを行った。

(a) あらかじめSCOPEのインデキシング機能により指示内容をテキストで登録しておく。レーザーポインタによるポインティングにより指示内容をカード上に重畳表示することができる。

(b) 壁に貼り付けたカードと同じ図形が描かれたカードの冊子を用意し、各カードの裏面に指示内容を書き込む。マニュア

(a) Superimposed display of instruction details

(b) Look up instruction details in booklet of cards

Fig. 10 Method used for test 1

ルを閲覧するように、図形に対応した指示内容を探すことができる。被験者数は10名でそれぞれ1回ずつ実験を行った。

4.2.3 実験1の結果と考察

指示内容を重畳表示させる場合と、マニュアルを閲覧する場合において16枚のカードを並べ終えるまでの時間を作業時間とし、計測した作業時間をFig. 11に示す。いずれの被験者においても重畳表示の方が作業時間が短く、ばらつきが少ない。一方、SCOPEのインデキシング機能により指示内容を登録するのに要した時間は、640秒（1件当たり平均40秒）であった。指示内容登録におけるユーザインタフェースの改良により登録に要する時間の短縮は可能であるが、登録件数が増えるにつれ無視できない時間と考えられる。作業効率の観点では、作業時の時間だけでなく、準備に要する時間も含めて総合的に判断する必要がある。しかしながら、本機能は、一度登録した指示内容を何度も利用する場合や、現場が劣悪な環境で少しでも現場での作業時間を短縮させたい場合に有効である。

4.2.4 実験2（指示内容の記憶残存性）

48枚のカードを壁に貼り、神経衰弱ゲームを行う。各カードには24種類のアルファベットから一文字を対応付け、24種類のペアを用意する。作業者は、2枚ずつカードを選択し、以下の2通りの方法でカードに関連付けられた内容を確認し、ペアを作る作業を行う。

(c) レーザポインタでカードを選択し、内容（アルファベット）を重畳表示させる。選択した2枚がペアでなかった場合はその2枚の内容を非表示に戻す。

(d) レーザポインタでカードを選択し、内容（アルファベット）を音声で再生させる。被験者数は3名でそれぞれ1回ずつ実験を行った。

4.2.5 実験2の結果と考察

すべてのペアを作り終えるまでの時間を作業時間とし、計測した作業時間をTable 2に示す。いずれの被験者においても重畳表示したほうが作業時間が短い。さらに、実験後の被験者からの感想によると、音声提示の方がストレスを感じた例が多かった。神経衰弱ゲームでは、一度めくったカードがペアでなければ、それを覚えておく必要がある。本実験の結果は、重畳提示の方が作業員の記憶に残りやすい可能性があるということを示唆している。熟練者が遠隔からサポートするに当たり、その場の問題に対処するだけであれば、音声で指示することで十

Fig. 11 Results of experiment 1

Table 2 Results of experiment 2

	Subject	Operation time
Superimposed display (method(c))	1	10min 41sec
	2	24min 38sec
	3	13min 01sec
Voice presentation (method(d))	1	15min 36sec
	2	30min 31sec
	3	17min 35sec

分な場合もある。しかし、現場作業員がその後もその作業を繰り返し行う必要がある場合、重畳提示により作業内容をより深く理解・記憶させる効果がある可能性があり、興味深い結果である。

5. 考 察

本論文では、人間同士のコラボレーションをサポートするためのロボットの機能として、実空間に情報を提示する機能を取り上げ、その効果を検証してきた。ロボットの機構としては垂直軸回転の1自由度のみを扱ったが、3章で述べたように、実世界の作業を想定すると作業空間を限定しないためには移動ロボットに載せるなど、自由度を増やす必要がある。ここでは、実空間に情報を提示する機能を移動ロボットに搭載する場合の課題について考察する。

我々が構築したSCOPEでは、視野共有機能を実現するために、Fig.4に示すようにカメラとプロジェクタを一体化し、カメラ視野範囲とプロジェクタ投影範囲とを一致させる方法をとった。この方法は投影面までの距離が常に一定であるという環境が前提となる。しかし、移動ロボットに搭載する場合、投影面までの距離は様々に変化するため、投影面までの距離が変化する度にカメラ視野範囲とプロジェクタ投影範囲とを一致させるためのキャリブレーションを行う必要がある。これに対し、カメラとプロジェクタの光軸を合わせることにより、対象物までの距離が異なる場合でも視野範囲を一致させることができる。

SCOPEでは、インデキシング機能および重畳提示機能を実現するに当たり、カメラの姿勢の変化量に連動させて投影画面を補正し、投影オブジェクトと属性情報を実空間上で静止しているように提示する。この方法は、カメラの姿勢が既知であることが前提となる。移動ロボットに搭載する場合、移動ロボットの自己位置姿勢が取得でき、それに応じて投影画面を補正する必要がある。本論文で対象とする系では、遠隔の熟練者が投影オブジェクトの位置を修正するなど人間が補正することも期待できるため、厳密な自己位置姿勢の取得ができなくてもよい可能性がある。今後は、まず既存の移動ロボットの自己位置同定手法を用いた投影画像補正機能を構築し、検証を行っていく予定である。さらに、投影情報が作業者に遮られない位置にロボットが移動するオクルージョン回避機能やメンテナンス等に必要のセンサ類を搭載し、センシング情報と関連付けた情報を投影する機能など、ロボットの知的機能を強化させることも検討していく予定である。

6. ま と め

本論文では、効率的な遠隔メンテナンス環境構築のため、人が真似できないようなロボットの機能を積極的に活用し、現場作業員と遠隔支援者の協調作業を現場のロボットがサポートするというコンセプト Robot-Supported Cooperative Work (RSCW) を提案した。そして、ロボットが備えるべき機能として、(1) 視野共有機能、(2) インデキシング機能、(3) 重畳提示機能の三つの実空間情報提示機能が重要であるという仮説を立て、検証システムSCOPEを構築した。そして、これらの機能に対し、遠隔からの作業指示において共通して行われる「対象物把握」と「指示内容の伝達」のフェーズを取り上げ、作業遂行時間の評価実験を行い、作業時間を短縮する効果があることを示した。さらに移動ロボットに実空間情報提示機能を搭載する場合の課題について考察した。今後は、プロジェクタとカメラの光軸を合わせた実空間情報提示機構を移動ロボットに搭載するなど適用可能範囲を拡大し、より実作業に近い環境での利用を目指す。

謝 辞 イラストをご提供くださった、すがみどりさんに感謝いたします。

参 考 文 献

- [1] E.G. Johnsen and W.R. Collis: "Teleoperators and Human Augmentation," AEC-NASA Technology Survey, NASA SP-5047, 1967.
- [2] S. Tachi, K. Tanie, K. Komoriya and M. Kaneto: "Tele-Existence(I): Design and Evaluation of a Visual Display with Sensation of Presence," Proc. of the 5th Symposium on Theory and Practice of Robot Manipulators, pp.245-254, 1984.
- [3] T. Machino, Y. Nanjo, Y. Yanagihara, H. Kawata, M. Motegi, S. Muto and K. Shimokura: "Remote Support System for Factory Operations using an Information Support Platform," ROBOMECH 2004, 2P1-H-10, 2004 (in Japanese).
- [4] H. Yamato, I. Kobayashi, S. Shiroyama, H. Masuda, M. Enomoto, H. Nishida and T. Nakamura: "Application of the Wearable Systems to Shipbuilding industrial engineering," Journal of the Society of the Naval Architects of Japan, vol.190, pp.431-438, 2001 (in Japanese).
- [5] H. Kuzuoka, S. Oyama, K. Yamazaki, K. Suzuki and M. Mitsuishi: "GestureMan: A Mobile Robot that Embodies Remote Instructor's Actions," Proc. Of CSCW2000, pp.155-162, 2000.
- [6] M. Mikawa and M. Matsumoto: "Smooth and Easy Telecommunication Using CTerm," Proc. of IEEE SMC '99, pp.732-737, 1999.
- [7] T. Watanabe and M. Okubo: "International Workshop on Sensory Evaluation of Expressive Actions of InterRobot for Human Interaction and Communication Support," Proc. of the 10th IEEE on Robot and Human Interactive Communication (RO-MAN2001), pp.44-49, 2001.
- [8] A. Hiraiwa, K. Hayashi, H. Manabe and T. Sugimura: "Alter-Ego Interface Technology," NTT Technical Review, vol.1, no.8, pp.72-76, 2003.
- [9] R.E. Kraut, M.D. Miller and J. Siegel: "Collaboration in Performance of Physical Tasks: Effects on Otcms and Communication," Proc. of the 1996 ACM conf. on Computer supported cooperative work, pp.57-66, 1996.

町野 保 (Tamotsu Machino)

1971 年 10 月 1 日、1994 年東北大学工学部通信工学科卒業。1996 年同大学大学院工学研究科電子工学専攻博士課程修了。同年日本電信電話株式会社(株)入社。現在サイバーソリューション研究所にて、モーションメディア技術、遠隔作業支援システム等の研究に従事。(日本ロボット学会正会員)

柳原義正 (Yoshimasa Yanagihara)

1955 年 2 月 2 日生。1978 年千葉大学工学部電子学科卒業。1980 年同大学工学研究科修士課程修了。1980 年日本電信電話公社(現:日本電信電話株式会社)に入社。同サイバーソリューション研究所主任研究員。マルチモーダルインターフェース、リモートコラボレーション技術などの研究に従事。博士(情報科学)、情報処理学会、ヒューマンインタフェース学会等の会員。(日本ロボット学会正会員)

士(情報科学)、情報処理学会、ヒューマンインタフェース学会等の会員。(日本ロボット学会正会員)

岩城 敏 (Satoshi Iwaki)

1935 年 2 月 17 日生。1984 年北海道大学大学院修士課程修了。同年、日本電信電話公社入社。1994 年ドイツカールスルーエ大学 IPR 客員研究員。1996 年 NTT FANET(株)に出向しロボット視覚センサ事業化。現在、NTT サイバーソリューション研究所にて、モーションメディア流通技術等の研究に従事。工学博士。明治大学非常勤講師兼任。JAFoE2004, 2005 チェア、SICE 等の会員。(日本ロボット学会正会員)

従事。工学博士。明治大学非常勤講師兼任。JAFoE2004, 2005 チェア、SICE 等の会員。(日本ロボット学会正会員)

南條義人 (Yoshito Nanjo)

1961 年 8 月 24 日生。1987 年早稲田大学大学院理工学研究科修士課程(機械工学専攻)修了。同年日本電信電話株式会社入社。1989~1998 年同社ヒューマンインタフェース研究所勤務。1998 年 NTT-IT 社出向。現在 NTT サイバーソリューション研究所にて主にネットワークロボット、リモートコラボレーション技術の研究に従事。主幹研究員。日本機械学会会員。(日本ロボット学会正会員)

(日本ロボット学会正会員)

河田博昭 (Hiroaki Kawata)

1977 年 10 月 13 日生。2001 年北海道大学工学部情報工学科卒業。2003 年同大学大学院工学研究科システム情報工学専攻修士課程修了。同年、NTT サイバーソリューション研究所入所。現在に至る。ヒューマンインタフェース、遠隔コラボレーションに関する研究に従事。電子情報通信学会の会員。

下倉健一郎 (Ken-ichiro Shimokura)

1959 年 4 月 1 日生。1984 年早稲田大学大学院理工学研究科博士前期課程修了。同年日本電信電話公社電気通信研究所入所。NTT ヒューマンインタフェース研究所、NTT 東日本マルチメディア推進部等を経て、2000 年より NTT サイバーソリューション研究所勤務。現在、ヒューマンアプライアンスプロジェクトプロジェクトマネージャ。この間 1993~1994 年 MIT 客員研究員。1999 年画像電子技術賞受賞。ユビキタスネットワーク/ネットワークロボット向けの情報流通プラットフォーム研究開発に従事。電子情報通信学会、日本機械学会、計測自動制御学会、画像電子学会等の会員。博士(工学、早稲田大学)。(日本ロボット学会正会員)

スプロジェクトプロジェクトマネージャ。この間 1993~1994 年 MIT 客員研究員。1999 年画像電子技術賞受賞。ユビキタスネットワーク/ネットワークロボット向けの情報流通プラットフォーム研究開発に従事。電子情報通信学会、日本機械学会、計測自動制御学会、画像電子学会等の会員。博士(工学、早稲田大学)。(日本ロボット学会正会員)