様　式　Ｃ－１９、Ｆ－１９－１、Ｚ－１９　（共通）

科学研究費助成事業　　研究成果報告書

令和　３ 年　 ６ 月　 ７ 日現在

機関番号：１０１０１
研究種目：基盤研究(C)（一般）
研究期間：2018～2020
課題番号：１８Ｋ０３８９６

研究課題名（和文）点品質最適化に基づく環境３次元計測点群データ処理手法の開発

研究課題名（英文）Development of data processing methods of 3D scanned point cloud of environments based on point quality optimization

研究代表者

伊達　宏昭（Date, Hiroaki）

北海道大学・情報科学研究院・准教授

研究者番号：２０３７４６０５

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費）　　3,400,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では，大規模環境や大型構造物の3次元計測点群データを様々な応用において安定かつ高精度に利用するための，計測品質を考慮した3次元計測データ処理手法群の開発を行った．具体的には，計測点群の各点における計測精度や信頼性を推定可能な点品質推定法の開発，高品質点群取得のための3次元計測支援技術の開発，ならびに，点品質に基づく高精度な処理を可能とする基本計測点群データ処理手法の開発を行い，実計測点群データへの適用を通してその有用性を定量評価した．

研究成果の学術的意義や社会的意義
本研究は，環境や構造物の3次元計測データ(点群)の計測品質の推定手法を確立し，計測品質を考慮したデータ処理手法が，従来法に比べてより高精度な処理結果をもたらすことを示している．また，高品質計測点群データの効率的取得を支援する技術を開発し，環境や構造物の維持管理，点検，保守，検査への3次元計測技術活用の高度化・高精度化のための基盤となる計測データ処理技術を構築している．

研究成果の概要（英文）：In this research, we developed methods of 3D scan data processing considering the scan quality in order to use 3D scan data of large-scale environments and structures more stably and accurately in several 3D applications. We developed methods for estimating the scan quality of 3D scan data (point clouds), methods for supporting 3D scan data acquisition to efficiently acquire high quality 3D scan data, and basic processing methods of 3D scan data based on the scan quality. The effectiveness of the methods were evaluated through experiments using real scan data of some environments and structures.

研究分野：形状処理

キーワード：3次元レーザ計測　3次元画像計測　点群　計測品質　計測データ処理　3次元計測支援

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

様　式　Ｃ－１９、Ｆ－１９－１、Ｚ－１９（共通）

１．研究開始当初の背景

プラントや設備，室内，市街地等の環境や，建物，橋梁，トンネル等の大型構造物の３次元計測技術が，対象の維持管理，保守，点検，検査や各種シミュレーション等に利用されてきている．環境や構造物の３次元計測データ（点群：３次元点の集合）の取得には，中長距離向けの３次元レーザスキャナや，画像集合からの 3 次元再構成技術が利用されている．計測点群の利用においては，ノイズ除去や位置合わせ，認識やモデリング等の複数の点群データ処理が必要であり，各処理に対する数多くの手法が提案されてきている．その一方で，データ処理がうまく機能するためには，点群取得のための計測システムや対象の計測環境が限定されたり，処理結果に対する品質担保が困難なため，結果として十分な精度のデータ処理結果が得られない場合があるという課題が存在する．そのため，処理精度や安定性の高い計測点群データ処理手法，ならびに，質の高い計測点群の取得手法の確立が必要となっている．

２．研究の目的

本研究の目的は，環境や構造物の３次元計測点群に対する計測信頼度や精度を表す点品質の推定手法の確立，推定した点品質を考慮した高精度点群データ処理手法の開発，ならびに，高品質計測点群を効率よく取得するための３次元計測支援技術の確立である．本研究は，3 次元計測技術と計測点群の点品質，ならびにデータ処理の関係を明らかにし，今後，ますます加速が進む幅広い計測点群利用を支えるための高精度点群データ処理の基盤を構築しようとするものである．

３．研究の方法

2 節の研究目的を達成するために，以下の(1)～(3)の手法，アルゴリズムならびにソフトウェアの開発とその有効性評価を行った．

(1) 計測点群の点品質の推定

中長距離レーザ計測における測距や，画像集合からの 3 次元再構成技術（SfM-MVS:Structure-from-Motion，Multi-View Stereo）における原理・方式の分析と，実レーザ計測・3 次元再構成点群の評価実験を通して，3 次元計測点群の点品質の推定法を確立した．

(2) 高品質点群の効率的取得のための計測支援

効率的な３次元計測と高品質な計測点群取得を支援するための計測支援技術の確立を目指し，画像集合からの 3 次元再構成において最適画像撮影位置を推定する方法，ならびに取得した計測点群の品質を迅速に確認するための計測点群 AR 表示技術について開発を行った．

(3) 点品質を考慮した点群データ処理

レーザ計測点群を対象とし，点品質を考慮した点群データ処理の高精度化手法の開発を行った．具体的には，計測点群の位置合わせ（レジストレーション），ノイズ除去や特定の対象物の認識におけるモデルフィットにおいて推定した点品質を利用する方法を考案し，実計測点群への適用と評価を通してその有効性を確認した．

４．研究成果

(1) 計測点群の点品質の推定

① レーザ計測点群に対する計測点品質の推定手法の確立

レーザ計測の原理や計測システムの特性に基づいて，レーザ計測点群の各点に関する測距精度，計測方向精度，点密度や点間隔，計測境界点信頼性(遮蔽の影響)を点品質として推定する方法を確立した．まず，レーザ反射の理論ならびに平板や円筒等の既知形状の計測実験を通して，レーザ測距誤差に強い影響を与える計測距離・レーザ入射角と計測品質（推定精度）との関係をモデル化した（図 1）[1)]．その後，レーザ反射強度も考慮した測距精度に関するモデル化と，同一環境複数回レーザ計測に基づく測距方向精度推定法を通して，レーザ計測点群の各点の計測精度品質を楕円体により表現する方法を開発した．更に，レーザ計測点群の計測境界点信頼性（遮蔽影響）の評価法[2)]を開発した．以上の開発手法は，下記(3)における点群データ処理への応用を通してその妥当性ならびに有用性を確認した．

② 画像集合からの 3 次元再構成点群に対する品質推定手法の確立

画像集合からの 3 次元再構成処理 (SfM-MVS) において，処理の初期段階（SfM）で得られる粗い再構成点群と画像撮影カメラ位置から，最終的に得られる再構成点群の品質に影響を与える可能性のある項目（点密度や対象物とカメラの位置関係などに関する計 12 項目，図 2 に例を示す）と再構成品質との関係を評価する方法を検討した[3)]．3 次元再構成点群の品質と各項目の推定品質評価値とを実験的に比較し，基線比，観察カメラ数，点密度が，画像集合からの高品質な再構成点群の取得に重要であることを明らかにした．また，複数の品質評価値からの単一品質予測評価指標を考案し，図 2 右下に示すような再構成モデル（点群やメッシュ）の品質予測を可能とする方法を開発した．

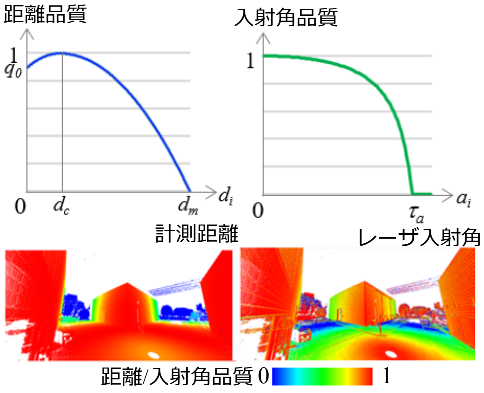

図1 レーザ計測点群の距離品質(左)と入射角品質(右)

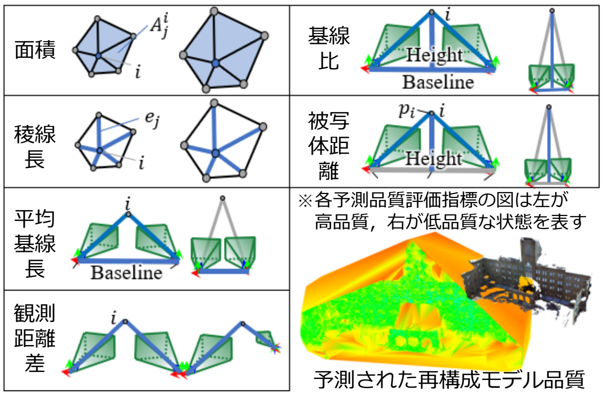

図2 3次元画像再構成モデルの品質予測評価指標例

(2) 高品質点群の効率的取得のための計測支援

① 画像集合からの3次元再構成における最適撮影計画支援システム

環境や構造物の効率的かつ高品質な点群取得を支援するための，画像集合からの 3 次元再構成における最適撮影位置推定手法の開発を行った[4]．本手法は，(1)②において推定した予測品質を用い，再構成モデルの推定低品質箇所に対して追加の画像撮影個所を提示するものである．橋梁や建物を含む屋外環境の 3 次元再構成に本手法を適用した結果，図 3 に示すように，開発法を用いて推定した最適撮影個所からの画像を追加することにより，ランダムな個所で撮影した画像を追加するよりも，再構成点群の欠損が少なく，再構成誤差が小さい高品質な再構成モデルが取得できることを確認した．

② レーザ計測点群のリアルタイム重畳表示技術

レーザ計測で取得した点群の品質を，計測現場で即座に計測作業者が確認することを可能とするための，レーザ計測点群の実環境撮影画像へのリアルタイム重畳表示システムを開発した[5]．計測済みの点群から生成した画像とカメラ画像との対応検出に基づいて，環境や構造物を撮影しているカメラの位置姿勢をリアルタイムに推定し，タブレット PC 上で，カメラ位置推定誤差平均 200mm 以下で約 1FPS の点群重畳表示が行えることを確認した．本技術により，図 4 に示すように，カメラ画像を通して，環境中の未計測部や重要箇所の点品質を直感的に確認できるようになり，計測点群の質の保証や，質の高い点群を取得するための追加計測計画が可能となる．

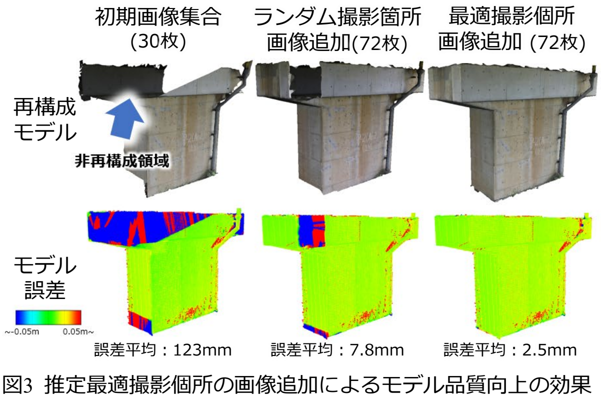

図3 推定最適撮影個所の画像追加によるモデル品質向上の効果

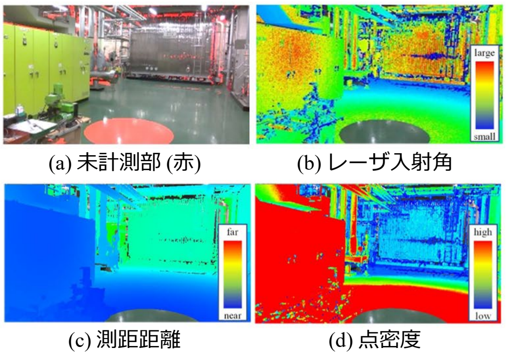

図4 カメラ画像への点群情報の重畳表示例

(3) 点品質を考慮した点群データ処理

① 位置合わせへの応用

(1)①で開発したレーザ計測点群の点品質推定法を点群位置合わせ（レジストレーション）手法に応用し，その有用性を確認した[1]．レーザ計測点群の位置合わせにおいてよく利用される，最近点間距離の反復的最小化に基づく ICP アルゴリズムにおいて，点品質推定値を最近点対応の信頼性重みとして導入し，設備と屋外環境の実計測点群の位置合わせ処理を行った．実験の結果，図 5 に示すように，点品質を考慮していない通常の ICP アルゴリズムと比べ，本実験では点群対の位置合わせの位置誤差が平均 6%，最大で 19%低減され，点品質を考慮した位置合わせ処理が処理精度向上に有効であることを確認した．

② ノイズ除去・曲面フィッティングへの応用

入射角とレーザ反射強度に関する計測品質を考慮したレーザ計測点群からのノイズ除去手法を開発した[6]．具体的には，移動最小二乗法を用いた計測ノイズ除去手法において点品

質を重みとして導入する方法を開発した．開発法を円筒形状のレーザ計測点群に対し適用し，ノイズ除去後の点群に円筒をフィットし，フィットした円筒の径の誤差を評価した．評価の結果，図 6 に示すように，入射角ならびに反射強度を重みとしたノイズ除去が，点群への曲面フィットの精度向上効果をもたらすことを確認した．

③ 屋内環境のモデル化への応用

屋内環境における壁面や天井に付属する窓や照明器具等の設備をレーザ計測点群から認識する手法へ，点間隔推定法と計測境界点信頼性の評価法を応用した[2)]．本認識手法は，設備が付属する面上の設備境界点に対する設備境界形状のフィッティングにより対象設備を認識するものであり，点間隔推定法を利用することでフィッティングに必要な許容誤差等のパラメータが点群に応じて自動設定可能となり，計測境界点から遮蔽の影響を受けて生じた点を除去することで設備境界点が安定して抽出できることを確認した．

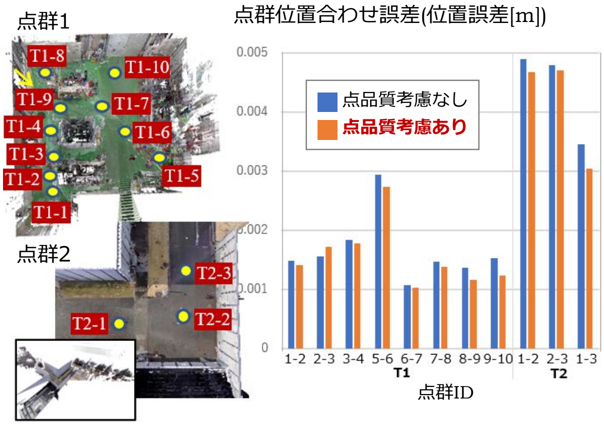

図5 品質考慮型点群位置合わせの効果

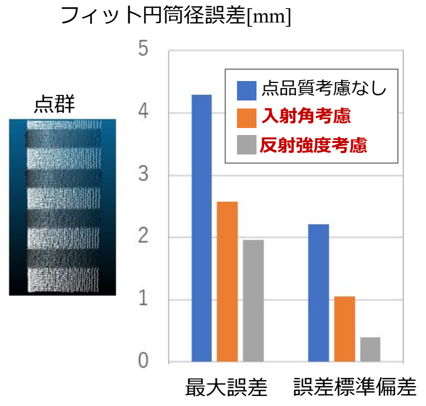

図6 品質考慮型ノイズ除去の効果

＜引用文献＞

1) H. Date, E. Wakisaka, Y. Moribe, and S. Kanai, TLS POINT CLOUD REGISTRATION BASED ON ICP ALGORITHM USING POINT QUALITY, Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci., XLII-2/W13, 963-968 (2019)

2) H. Takahashi, H. Date, S. Kanai, K. Yasutake, DETECTION OF INDOOR ATTACHED EQUIPMENT FROM TLS POINT CLOUDS USING PLANAR REGION BOUNDARY, Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci., XLIII-B2-2020, 495-500 (2020)

3) R. Moritani, S. Kanai, H. Date, Y. Niina, and R. Honma, QUALITY PREDICTION OF DENSE POINTS GENERATED BY STRUCTURE FROM MOTION FOR HIGH-QUALITY AND EFFICIENT AS-IS MODEL RECONSTRUCTION, Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci., XLII-2/W13, 95-101(2019)

4) Ryota Moritani, Satoshi Kanai, Hiroaki Date, Yasuhito Niina, and Ryohei honma, Plausible reconstruction of an approximated mesh model for next-best view planning of SfM-MVS, Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci., XLIII-B2-2020, 465-471 (2020)

5) Kenta Ohno, Hiroaki Date, and Satoshi Kanai, Study on Real-Time Point Cloud Superimposition on Camera Image to Assist Environmental Three-Dimensional Laser Scanning, International Journal of Automation Technology, 15(3), 324-333 (2021)

6) Kohei Tsubooka, Satoshi Kanai, Hiroaki Date, Tatsuo Hariyama, Masahiro Watanabe, Precise Denoising of 3D Point Clouds with Awareness of Point-Wise Measuring Quality, Proc. the 18th International Conference on Precision Engineering (ICPE), D-5-6 (2020)

５．主な発表論文等

〔雑誌論文〕　計1件（うち査読付論文　1件／うち国際共著　0件／うちオープンアクセス　1件）

1．著者名 Kenta Ohno, Hiroaki Date, and Satoshi Kanai	4．巻 15(3)
2．論文標題 Study on Real-Time Point Cloud Superimposition on Camera Image to Assist Environmental Three-Dimensional Laser Scanning	5．発行年 2021年
3．雑誌名 International Journal of Automation Technology	6．最初と最後の頁 324, 333
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.20965/ijat.2021.p0324	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕　計20件（うち招待講演　0件／うち国際学会　5件）

1．発表者名 R. Moritani, S. Kanai, H. Date, Y. Niina, and R. Honma
2．発表標題 QUALITY PREDICTION OF DENSE POINTS GENERATED BY STRUCTURE FROM MOTION FOR HIGH-QUALITY AND EFFICIENT AS-IS MODEL RECONSTRUCTION
3．学会等名 ISPRS Geospatial Week 2019（国際学会）
4．発表年 2019年

1．発表者名 H. Date, E. Wakisaka, Y. Moribe, and S. Kanai
2．発表標題 TLS POINT CLOUD REGISTRATION BASED ON ICP ALGORITHM USING POINT QUALITY
3．学会等名 ISPRS Geospatial Week 2019（国際学会）
4．発表年 2019年

1．発表者名 髙橋勇斗，伊達宏昭，金井　理，安武和成
2．発表標題 レーザ計測点群からの屋内環境モデリング-天井面付属設備の自動抽出-
3．学会等名 2020年度精密工学会春季大会学術講演会
4．発表年 2020年

１．発表者名 森谷亮太，金井　理，伊達宏昭，新名恭仁，本間亮平
２．発表標題 SfM-MVSによる効率的で高品質なas-isモデル生成のための最適撮影計画支援システムの開発（第5報）-幾何学的特徴を用いた近似物体表面モデルの改良-
３．学会等名 2020年度精密工学会春季大会学術講演会
４．発表年 2020年

１．発表者名 森谷亮太，金井理，伊達宏昭，新名恭仁，本間亮平
２．発表標題 SfM-MVS向け最適撮影計画支援システムのための品質予測指標の改善および撮影不足箇所の推定
３．学会等名 日本写真測量学会令和元年度秋季学術講演会
４．発表年 2019年

１．発表者名 森谷亮太，金井理，伊達宏昭，新名恭仁，本間亮平
２．発表標題 SfM-MVSによる効率的で高品質なas-isモデル生成のための最適撮影計画支援システムの開発（第3報）-モデル品質予測指標の改善-
３．学会等名 2019年度精密工学会秋季大会学術講演会
４．発表年 2019年

１．発表者名 髙橋勇斗，伊達宏昭，金井理
２．発表標題 レーザ計測点群からの規則性を考慮した屋内環境モデリング -矩形境界認識に基づく屋内物体のモデリング-
３．学会等名 2019年度精密工学会秋季大会学術講演会
４．発表年 2019年

１．発表者名
Hayato Takahashi, Hiroaki Date, Satoshi Kanai, and Kazushige Yasutake

２．発表標題
Detection of indoor attached equipment from TLS point clouds using planar region boundary

３．学会等名
XXIV ISPRS Congress 2020（国際学会）

４．発表年
2020年

１．発表者名
Ryota Moritani, Satoshi Kanai, Hiroaki Date, Yasuhito Niina, and Ryohei Honma

２．発表標題
Plausible reconstruction of an approximated mesh model for next-best view planning of SfM-MVS

３．学会等名
XXIV ISPRS Congress 2020（国際学会）

４．発表年
2020年

１．発表者名
森谷亮太，金井理，伊達宏昭，新名恭仁，本間亮平

２．発表標題
SfM-MVSによる効率的で高品質なas-isモデル生成のための最適撮影計画 - 貪欲法による低品質領域の推定手法の開発 -

３．学会等名
日本写真測量学会北海道支部第37回学術講演会

４．発表年
2019年

１．発表者名
森谷亮太，金井理，伊達宏昭

２．発表標題
Structure from Motionによる効率的で高品質なas-isモデル生成のための最適撮影計画(第2報)　―近似物体表面モデルの生成と品質予測指標の推定―

３．学会等名
2018年度精密工学会北海道支部学術講演会

４．発表年
2018年

１．発表者名
浦田昇尚，伊達宏昭，金井理，後藤孝行，安田星季

２．発表標題
鋳造品の迅速リバースエンジニアリングに関する研究－計測シミュレーションに基づく鋳造品の最適計測姿勢推定手法の有用性評価－

３．学会等名
2018年度精密工学会秋季大会学術講演会

４．発表年
2018年

１．発表者名
大野健太，伊達宏昭，金井理

２．発表標題
環境3次元レーザ計測支援のための点群重畳表示に関する研究-カメラ画像と点群画像を用いた自己位置姿勢推定-

３．学会等名
2020年度精密工学会秋季大会学術講演会

４．発表年
2020年

１．発表者名
森谷亮太，金井理，伊達宏昭，新名恭仁，本間亮平

２．発表標題
SfM-MVSによる効率的で高品質なas-isモデル生成のための最適撮影計画支援システムの開発（第6報）- 低品質領域抽出結果に基づく追加撮影用カメラ位置の推定-

３．学会等名
2020年度精密工学会秋季大会学術講演会

４．発表年
2020年

１．発表者名
阿久津啓，金井理，伊達宏昭，新名恭仁，本間亮平

２．発表標題
機械学習を用いたSfM-MVS再構成点群の精度品質予測

３．学会等名
2020年度精密工学会秋季大会学術講演会

４．発表年
2020年

１．発表者名
大野健太，伊達宏昭，金井理

２．発表標題
環境3次元レーザ計測支援のためのカメラ画像へのリアルタイム点群重畳表示に関する研究-点群色調補正による複数点群の重畳表示-

３．学会等名
2021年度精密工学会春季大会学術講演会

４．発表年
2021年

１．発表者名
阿久津啓，金井理，伊達宏昭，新名恭仁，本間亮平

２．発表標題
深度信頼度を用いたSfM-MVS再構成点の精度レベル推定

３．学会等名
2021年度精密工学会春季大会学術講演会

４．発表年
2021年

１．発表者名
森谷亮太，金井理，伊達宏昭，新名恭仁，本間亮平

２．発表標題
SfM-MVSによる効率的で高品質なas-isモデル生成のための最適撮影計画支援システムの開発（第8報）-追加撮影終了条件の検討-

３．学会等名
2021年度精密工学会春季大会学術講演会

４．発表年
2021年

１．発表者名
坪岡航平，金井理，伊達宏昭

２．発表標題
計測点信頼度を考慮した3次元点群の高精度デノイジング（第2報）-MLSとBilateral Filterのアルゴリズム改良によるデノイジング誤差の低減-

３．学会等名
2021年度精密工学会春季大会学術講演会

４．発表年
2021年

1．発表者名 Kohei Tsubooka, Satoshi Kanai, Hiroaki Date, Tatsuo Hariyama, Masahiro Watanabe
2．発表標題 Precise Denoising of 3D Point Clouds with Awareness of Point-Wise Measuring Quality
3．学会等名 the 18th International Conference on Precision Engineering (ICPE2020)（国際学会）
4．発表年 2020年

〔図書〕　計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

北海道大学 大学院情報科学研究院 システム情報科学部門 ディジタル幾何処理工学研究室 https://www.ist.hokudai.ac.jp/labo/dgp

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
研究分担者	金井　理 (Kanai Satoshi) (90194878)	北海道大学・情報科学研究院・教授 (10101)	

7．科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕　計0件

8．本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関