

令和 2 年 6 月 4 日現在

機関番号：22604

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K01260

研究課題名(和文)作業分析効率化方法の開発に関する研究

研究課題名(英文)Study for the development of methods for improving efficiency of work analysis

研究代表者

梶原 康博 (KAJIHARA, YASUHIRO)

首都大学東京・システムデザイン研究科・教授

研究者番号：70224409

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：作業分析を自動化するために解決する必要がある重要な課題として、作業者の動線測定および動作分析の自動化が挙げられる。本研究では、作業者の動線の測定に関しては電波および超音波を用いて動線を測定する従来法を基に測定精度を向上させる方法を開発した。動作の分析に関しては、超音波を用いて測定された作業者の位置と加速度センサーにより測定される利き手の加速度から動作を推定できる方法を開発した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究を通して、屋内の作業者および物の位置を測定するためにRFID技術、加速度センサーおよび超音波センサーを用いて作業分析を速やかに行なうことが可能となった。多くの製造事業所で行われている作業改善活動に寄与できることから、経営工学および機械工学の観点から現実社会の要請に応えることができる。さらに、本研究の成果は、作業改善活動の効率化だけでなく、小売店、公共施設などにおける人、物の動線の追跡、行動の分析に応用することで、販売戦略、安全確保の問題解決などへの波及効果が得られることが期待される。

研究成果の概要(英文)：The automation of the measurement of a worker's flow line and the analysis of his motion is among the important problems which need to be solved in order to automate work analysis. In this study, with respect to the worker's flow line measurement, we developed a method which provides better measurement accuracy by ameliorating a conventional flow line measurement method that utilizes radio waves and ultrasonic waves. With respect to the worker's motion analysis, we developed a method capable of estimating his motion from his position which is obtained using ultrasonic waves and the acceleration of his dominant hand which is measured by an acceleration sensor.

研究分野：経営工学

キーワード：経営工学 作業分析 屋内測位

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

2016年度工業統計調査によれば従業員4人以上の製造事業所数は国内で20万社を超えており、多くの事業所において作業改善活動が継続的に行われている。作業改善活動の手順は、作業分析と作業方法の改善に大別される。作業分析は、1939年にH. B. MaynardとG. J. Stegemertenにより最初に体系化され、作業の実態を把握するために人・物の動線、作業者の動作、作業時間などが測定される。1930年代から今日までの測定手段は、ストップウォッチおよびVTRが中心であり、作業分析に多くの時間がかかるという課題がある。1990年代からは、画像処理、磁気センサーなどを用いたモーションキャプチャーが導入され、動作分析の自動化への取り組みが行われている。しかし、モーションキャプチャーは測定範囲が狭いこと、複数の作業者が共同して進める組作業の分析には適用できないなどの課題がある。また、物の動線を測定する手段としてバーコードを用いる方法が試みられているが、作業者の持ち場に物が到着するたびにバーコード読み取り作業が必要となるために、付加価値を生まない作業時間が増加し、生産性が低下するという課題がある。一方、作業方法の改善に関しては、1940年代以降、H. B. Maynardなどにより、標準時間資料法(PTS法)が開発された。PTS法は、予め動作毎に定められた時間値から標準時間を設定する方法であり、PTS法の普及により、標準時間を設定するために費やされる工数が大きく低減された。1990年代からは、生産シミュレータの活用により、設備レイアウトの改善に要する工数も大きく低減された。さらに、2000年代からは、画像処理、ロボット、シーケンス制御装置を制御するためのソフトウェアの改良により、加工・組立作業を自動化するためのシステム開発工数が着実に低減されている。以上のことから、作業方法改善の効率化技術の発展と比較して、作業分析効率化のための技術開発の遅れが顕著となっている。

2. 研究の目的

作業分析を自動化するために解決する必要がある重要な課題として、作業者の動線測定および動作分析の自動化が挙げられる。本研究では、作業者の動線の測定に関しては電波および超音波を用いて動線を測定する従来法を基に測定精度を向上させる方法を開発する。動作の分析に関しては、超音波を用いて測定された作業者の位置と加速度センサーにより測定される利き手の加速度から動作を推定できる方法を開発する。

3. 研究の方法

本研究では作業分析の自動化に関して以下の3つの方法を開発する。

(1) UHF帯RFIDによる屋内位置測定方法の開発

従来のRFIDを用いた屋内位置測定方法に関して、マルチパスによる位置測定精度への影響を低減する。作業者に複数のタグを取り付けることにより、常に一つ以上のタグが検知されるようにする。作業者の位置を変え、タグの読取試行回数と読取成功回数の比で表される読取率を測定し、読取率を入力データ、作業者の位置を出力データとするデータセットを作成する。次に、このデータセットを用い、汎化誤差を指標にして入力データから作業者の位置を推定するモデルを求める。以上の方法を実装し、適用例により有効性を検証する。

(2) 電波および超音波センサーによる屋内位置測定方法の開発

電波(BLE: Bluetooth Low Energy)と超音波を用いて、作業者の位置および動線を測定する。電波を用いる測定装置は、スマートウォッチと複数のスマートフォンにより構成される。スマートウォッチは作業者に装着され、加速度情報を含むBLE信号を発信する。複数のスマートフォンによりBLE信号を受信する。複数のスマートフォンによる受信電波強度を説明変数として作業者の大凡の位置を推定するための推定モデルを求める。推定モデルとして、線形判別関数、決定木などの統計モデルを候補とし、交差検証法による汎化誤差を指標として選定する。次に、推定された位置の近傍にある超音波センサーにより、作業者の位置を高精度に推定する。以上の方法を実装し、適用例により有効性を検証する。

(3) 加速度センサーおよび超音波センサーによる作業分析方法の開発

超音波センサーにより作業者の位置および動線を測定する。並行して、スマートフォンにより利き腕の加速度を測定する。作業者の位置と利き手の加速度を説明変数として動作を推定するための推定モデルを求める。推定モデルとして、線形判別関数、決定木などの統計モデルを候補とし、交差検証法による汎化誤差を指標として選定する。以上の方法を実装し、衣類流通加工の作業分析に適用し、有効性を検証する。

4. 研究成果

(1) UHF帯RFIDによる屋内位置測定方法の開発

RFID装置は、アンテナ、受信機および主制御装置(Master Controller: MCON)から構成される。構成例を図1に示す。アンテナは天井に下向きに設置される。MCONの指令によりアンテナから下方のタグに向けて電波が送信される。タグの内部では、受信した電波により内部アンテナが起電され、整流器を介して制御回路の動作に必要な電力が発生する。従って、タグは電界強度が高いほど起電されやすく、読取率が高くなる。読取率は、各アンテナによるタグ検知のための読取試行回数と読取成功回数との比率を表す。タグから、電波を受けたアンテナの番号、タグのIDなどが受信機に送信され、MCONにより読取率が計算される。アンテナから送信された電波がタグに到達するまでの経路は、タグに直接到達する経路と壁や床で反射した後に到達する経路

が混在するマルチパスとなり、経路長差による位相遅れが生じる。位相遅れが半波長となる位置では、タグによる受信電波強度が零に近くなる。アンテナ直下の任意の高さにあるタグの受信電界強度の例を図2に示す。電界強度が低い位置ではタグが起電されないため、位置が検知されない。この問題の対策として、複数のタグを高さを変えて作業者に付けることにより、いずれかのタグが起電され、位置が検知されるようにする。次に、複数のアンテナによる読取率を説明変数としてタグの位置を推定するモデルを求める。推定モデルとして線形判別関数、決定木、k最近傍モデル、ニューラルネットワーク（以降、NN）等が考えられる。複数の推定モデルの推定能力を評価するための指標としてk分割交差検証法により得られる汎化誤差を用い、汎化誤差が最小となる推定モデルを選定する。選定された推定モデルにより新たに入力される読取率から作業者の位置を推定する。

提案方法を実装するためにUHF帯RFID装置を用いた。適用例として、5m×7mの作業域において、静止対象の位置推定精度を調べた。棚の上段（1.0m）に静止対象が置かれている状況を想定した。複数タグの読取率が向上するように10cmの間隔を空け、3つのタグを高さ0.9m、1.0m、1.1mの位置に取り付け、すべての測定点に静止対象を平行移動して読取率を測定した。位置推定に関してはk最近傍モデルの汎化誤差が最小となったことから、静止位置推定モデルとした。さらに、新たに117点の位置に移動し、読取率を測定した。k最近傍モデルにより117点の読取率に対して静止対象の位置を推定した結果、位置推定誤差は平均値0.02m、標準偏差0.004m、最大値1.0mであった。次に、静止対象の高さ推定精度を調べるために、棚の上段（1.0m）と下段（0.2m）に測定対象が置かれている状況を設定した。高さ推定にもk最近傍モデルが選ばれた。新たに、高さが0.2mおよび1.0mの静止対象を測定領域内の117点の測定点に移動させて読取率を測定した。静止対象の高さを推定した結果、すべての測定点117点で高さが正しく推定された。製造現場で用いられるパレットの規格は、1辺が1.1mの正方形である。従って、提案方法はフォークリフト等によるパレットの搬入、搬出作業における取り違えを把握できる位置推定精度であることが示された。さらに、静止対象の高さ測定では、80cmの違いを100%の精度で推定できることが示された。

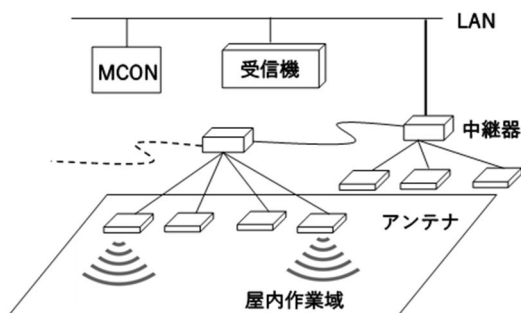


図1 装置の構成

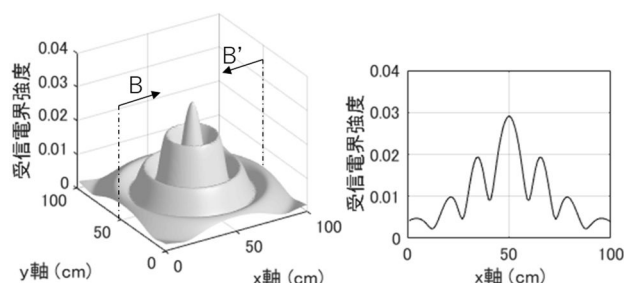


図2 アンテナ直下の受信電界強度例

(2) 電波および超音波センサーによる屋内位置測定方法の開発

電波（BLE: Bluetooth Low Energy）と超音波センサーを用いて、作業者の動線を測定する。測定装置の構成を図3に示す。スマートウォッチ、複数のスマートフォンおよび超音波センサーにより構成される。スマートウォッチと超音波発信器は作業者に装着する。スマートウォッチからは加速度データを含むBLE信号が発信され、複数のスマートフォンによりBLE信号を受信し、受信電波強度を測定する。超音波センサーは超音波の到達時間を基に発信器から受信機までの距離を測定できるが、波長が短いために回折が小さく、棚や柱などの障害物により遮られるという課題がある。そこで、作業域を複数のエリアに分割し、対象がどのエリアに居るのかをBLE電波により推定する。次に、推定されたエリア内にある超音波センサーにより対象の詳細な位置を測定する。換言すれば、BLE電波により位置測定に用いる超音波受信機を逐次的に選定する。

本方法では、作業者の位置（エリア）をBLE電波強度から推定するために最適化理論を用いる。まず、学習データを収集する。位置が既知の場所に移動し、複数のスマートフォンにより電波強度を測定する。各スマートフォンで測定される電波強度を入力ベクトル、スマートウォッチの位置（エリア番号）を出力値とし、入出力のペアとする。この入出力の関係を推定モデルで表せるように推定モデルを求める。推定モデルとしては、ニューラルネットワーク、決定木などが考えられることから、推定モデルの選定には交差検証法を用いる。この手順によりスマートウォッチを装着した作業者の大凡の位置（エリア番号）をBLE電波強度から推定する。次に、作業者の位置（エリア番号）の近傍にある超音波センサーにより、正確な位置を次の手順により求める。複数の超音波受信器により超音波を受信し、到達時間から発信器までの距離を求める。各受信器の設置位置を円の中心とし、発信器までの距離を半径とする円を描き、複数の円の交点を発信器の位置とする。

当該方法の有効性を検証するための実験を行った。実験域のレイアウトを図4に示す。実験域は縦14m、横14mであり、高さ0.7mの机が複数ある。壁面にはキャビネットおよび書架が設置されている。部屋の中央に高さ1.8mの衝立がある。超音波受信器を7個測定範囲内に設置した。衝立の位置を境として、実験域をy座標6.0未満のエリア1とy座標6.0m以上のエリア2に区分し、位置推定に用いる超音波センサーを区別した。作業者の動線を同図に示す。作業者は机の周りの空きスペースを通り、衝立の周囲をほぼ一周した。作業者がエリア1にいるときの超音波センサーによる測定距離例を図示している。エリア1には4つの受信器が設置されている。これらの4つの受信器の測定距離を半径とする円が一点で交わり、作業者の位置が正しく推定されていることが確認された。紙面の制約により割愛するが、同位置においてすべての超音波センサーを用いて位置推定が行われる従来法では動線を正確に測定することが困難な環境であることが確認された。提案法は、このような測定環境においても正しく動線を測定できることが確認された。

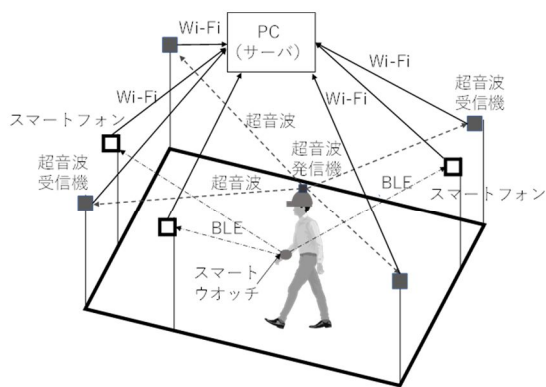


図3 装置の構成

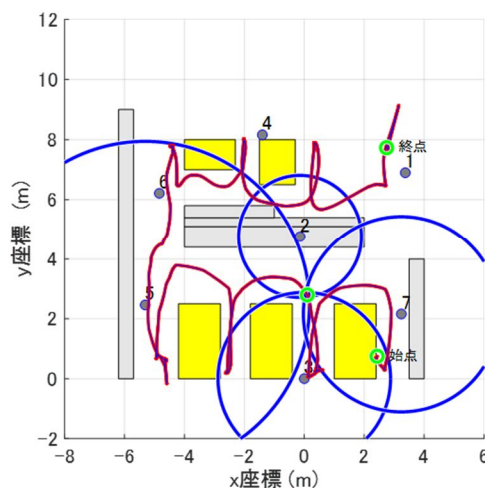


図4 実験域のレイアウトおよび動線

(3) 加速度センサーおよび超音波センサーによる作業分析方法の開発

装置の構成を図5に示す。超音波センサー、スマートフォンおよびPCから構成される。超音波センサーにより作業者の位置を測定する。超音波の到達時間 (Time of Flight: TOF) を基に発信器から受信機までの距離が測定される。各受信器の設置位置を円の中心とし、発信器までの距離を半径とする円を描き、複数の円の交点が発信器の位置として推定される。この過程の模式図を図6に示す。従来では、すべての受信器において発信器までの測定距離が正しいことが仮定されている。実際には、屋内の障害物の影響により受信器から発信機までの距離に測定誤差が生じる受信器が生じる。測定誤差が生じる受信器は発信器の位置により変わるため、発信器の位置推定に用いる受信器を逐次的に選択する。図6に4つの受信器および各受信器により計測された発信器までの測定距離を半径とする円を例示する。発信器の位置は円の交点として求まる。ただし、測定距離に誤りがある (一点鎖線の) 場合には、円は他の円の交点を通らない。そこで、各受信器について、動線上のk-1番目とk番目の推定位置から送信器までの距離の変化量を求め、この距離の変化量が小さい受信器を3つ選び、k+1番目の位置推定に用いる。図6で

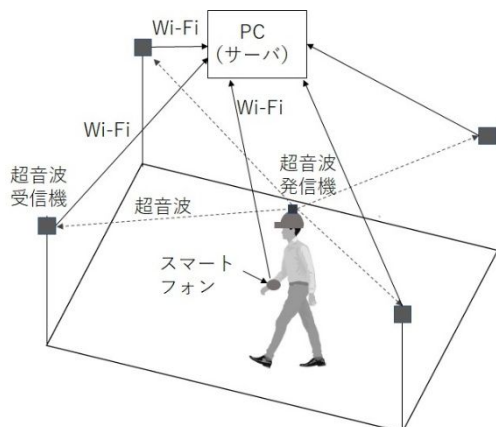


図5 装置の構成

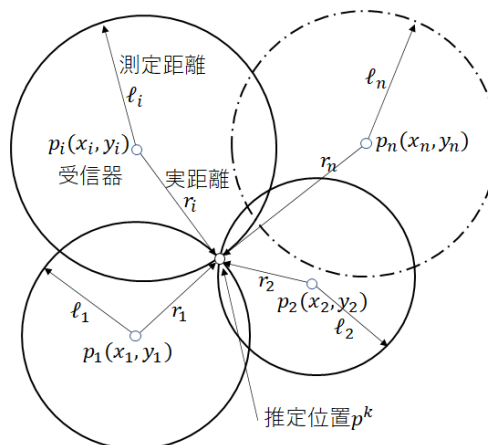


図6 超音波センサーによる位置測定方法

は、一点鎖線で描かれた円に該当する受信器を $k+1$ 番目の位置推定から除外する。

次に、作業者の位置、速度および利き手の加速度データを基に動作を推定する。動作として、移動（歩行）および主作業（ピッキング、検品、梱包、台車へのアイテムの積み込みなど）を考える。移動は主作業よりも移動速度が大きい。ピッキング、台車への積込、梱包等は作業が行われる場所が異なる。さらに、作業者が主作業を行う時には、移動に比べて利き手の加速度が大きくなると考えられる。これらの状況を考慮し、推定モデルの出力値として移動を 1、台車への積込を 2、ピッキングを 3 と設定する。両者の関係を表す推定モデルとして決定木、 k 最近傍法モデル等が考えられることから、推定モデルを選定するための指標として k 分割交差検証法による汎化誤差を用いる。

提案方法を実装したシステムにより作業分析を行い、フィルム分析による結果と比較した。作業域の一部 $16\text{m} \times 16\text{m}$ の範囲を測定域とした。超音波センサーによる位置測定精度は、 x 座標の測定誤差は平均値 0.06m 、標準偏差 0.14m であった。 y 座標の測定誤差は平均値 -0.01m 、標準偏差 0.12m であった。1 バッチ分のピッキングの動線例を図 7 に示す。動線上の○印は、移動速度が 0.2m/sec 以下となった場所を示す。次に、作業分析を自動化するための動作推定モデルを求めた。本例では k 最近傍法モデルの汎化誤差が最小となった。さらに、測定で得られたデータセットを 5 組に分け、データセットの 2 組～5 組を学習セットとして k 最近傍法モデルの制御変数を求めた。次に、1 組のデータセットに対して動作を推定した。1 組のデータセットに対する推定結果とフィルム分析により得られた動作の実測値との一致個数を表 1 に示す。両方法による動作分析の一致の程度を表す κ 係数は 0.66 となり、結果の一致の程度（reproducibility）は良好と判断された。また、1 組のデータセットにおける各動作の時間割合に関して、ビデオ分析による結果と推定モデルによる結果を図 8 に示す。各動作の時間割合の差は 1% 以内であった。以上のことより、提案方法による作業分析性能に関しては実測値との一致の程度から見て実用性が示されたと考えられる。

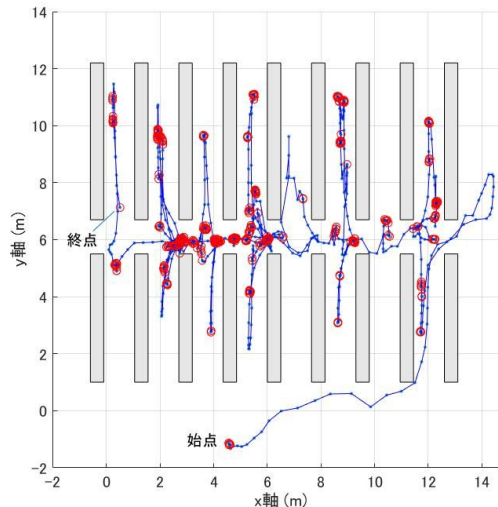


図 7 物流センターにおける動線測定例

表 1 提案方法による推定結果とフィルム分析による動作との一致個数

		推定モデル			
		移動	台車	ピッキング	計
フィルム分析	移動	64	4	16	84
	台車	2	16	1	19
	ピッキング	15	0	71	86
	計	81	20	88	189

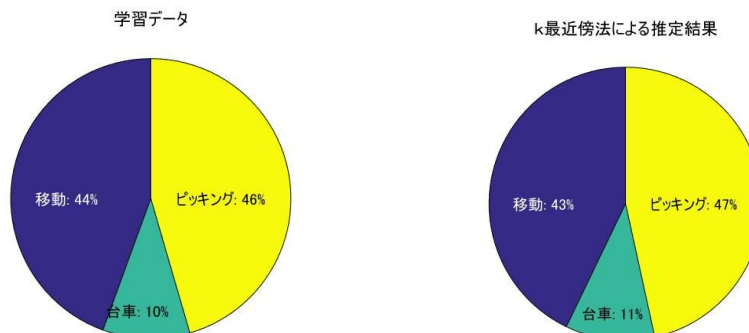


図 8 稼働分析に関する実測値と提案方法の比較

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 Liang Shuyu, Yasuhiro Kajihara, Masanari Hakkaku, Ataru Makoshi, Takashi Shinzato	4. 巻 70 2E
2. 論文標題 Study of a System for Supporting the Analysis of Distribution Processing Work at a Logistics Center - A Case Study of Analyzing Picking Work in a Retail Clothing Order Fulfillment Center-	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Japan Industrial Management Association	6. 最初と最後の頁 124-135
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.11221/jima.70.124	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 -
1. 著者名 Xiaowen Zhao, Liang Shuyu, Yasuhiro Kajihara, Hisashi Yamamoto	4. 巻 39
2. 論文標題 Indoor Flow Line Measurement Method Based on Radio Waves and Ultrasonic Sensors	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Procedia Manufacturing	6. 最初と最後の頁 1104-1111
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.01.360	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 -
1. 著者名 Liang Shuyu, 麓敦子, 梶原康博, 田淵雄也, 新里隆	4. 巻 30
2. 論文標題 UHF帯RFIDによる屋内位置推定方法	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 日本設備管理学会誌	6. 最初と最後の頁 10-18
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 -
1. 著者名 ウアテイ, 梶原康博, 新里隆, 林之久	4. 巻 69
2. 論文標題 従業員の職務満足と継続就業意思の経年変化とその因果関係に関する研究	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 日本経営工学会論文誌	6. 最初と最後の頁 33-45
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.11221/jima.69.33	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3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 Yating Yu, Mingyu Zhang, Yasuhiro Kajihara
2. 発表標題 Study on Automation of Picking Operation Analysis
3. 学会等名 14th International Conference on Industrial Management (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Tomohisa Takagi, Yasuhiro Kajihara, Masanobu Eguchi
2. 発表標題 A Method for Automatically Counting the Number of Steel Pipes in Steel Works
3. 学会等名 14th International Conference on Industrial Management (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yuya Tabuchi, Liang Shuyu, Zhang Mingyu, Atsuko Fumoto, Yasuhiro Kajihara, Takashi Shinzato
2. 発表標題 A Method using RFID for Estimating Position of Indoor Objects
3. 学会等名 ACMSA2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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	新里 隆 (SHINZATO TAKASHI) (70574614)	玉川大学・工学部・助教 (32639)	