

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 27 日現在

機関番号：84506

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2016

課題番号：25350807

研究課題名(和文) 駆動トルクに着目した車いすマラソンにおける効率的な駆動フォームに関する研究

研究課題名(英文) Measurements of wheels propulsion torque to improve propelling form of wheelchair athletes

研究代表者

中村 俊哉 (NAKAMURA, Toshiba)

兵庫県立福祉のまちづくり研究所・その他部局等・技師

研究者番号：20426547

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の目的は、車いすマラソン競技者の競技力向上を支援するために、駆動フォームの評価・提案システムの構築を行うことである。本研究では、空気抵抗に影響を及ぼす前面投影面積と車いすを漕ぐときに競技者が行った仕事を駆動フォームの評価指標とし、深度センサが撮影した深度画像から前面投影面積を推定するプログラムを作成した。車いすを漕ぐときに競技者が行った仕事を推定可能な計測用ホイールを開発し、推定された仕事が競技力の評価指標として有効であることを確認した。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this research is to construct a wheelchair propelling form evaluation / suggestion system to support the improvement of the competition skills of wheelchair marathon athletes. In this study, the frontal projected area that affects air resistance and the work of the athlete stroke are adopted as the evaluation index of propelling form. A computer program is developed to estimate the frontal projected area from the depth image taken by the depth sensor. We developed measuring wheels by which we can estimate the stroke work done by an athlete. It is considered that the estimated work might be effective to evaluate competitive performances.

研究分野：リハビリテーション工学

キーワード：車椅子 障害者スポーツ 車椅子マラソン 駆動力 角速度 トルク

1. 研究開始当初の背景

車いす使用者が行う競技スポーツの1つに車いすマラソンがある。競技者は競技力向上のために身体機能を鍛えている。また、競技力は車いすの設定や車いすの漕ぎ方(以下、駆動フォーム)の影響も受ける。従って競技力の向上には、身体機能の向上に加えて、車いすを競技者自身にとっての適切な設定に調節することや、練習を繰り返し適切な駆動フォームを習得することが重要である。

左半身と右半身に器質的・機能的な差が生じていない競技者では、左右で差が生じていない駆動フォームが効率的と考えられる。しかし、左半身と右半身に器質的・機能的な差が生じている競技者も少なからずいる。器質的・機能的な差が生じている場合には、左右の駆動フォームを揃えると、結果的に発揮できるパフォーマンスが低下する可能性がある。そのため、競技者によっては左右の駆動フォームに差があるままのほうが、パフォーマンスが良いことも考えられる。また、車いすマラソンでは空気抵抗の影響も大きい。器質的・機能的差が生じている競技者の場合は、空気抵抗を受けにくい駆動フォームでは発揮できるパフォーマンスが減少してしまう可能性がある。

従って、左半身と右半身に器質的・機能的な差が生じている競技者では、目標とする駆動フォームを「一般的に効率的といわれている駆動フォームに似ているかどうか」や「左右の駆動フォームがそろっているかどうか」といった駆動フォームの運動学的な評価だけでなく、その駆動フォームで発揮されるパフォーマンスに基づいた評価も用いて判断する必要がある。

2. 研究の目的

本研究の目的は、車いすマラソン競技者の競技力向上を支援するために、駆動フォームの評価・提案システムの構築を行うことである。

3. 研究の方法

本研究では、空気抵抗に影響を与える「前面投影面積」と三次元座標の計測システム、並びに競技者が発揮するパフォーマンスとして競技者がホイールを漕いだときに行った仕事に着目し、仕事を算出するために「駆動トルク」と「角速度」の計測が可能なホイール(以下、計測用ホイール)の開発を行い、それらを活用して構築した駆動フォームの評価・提案システムを用いて駆動フォームの評価を実施する。

4. 研究成果

(1)「前面投影面積」と三次元座標計測システムの構築について

一般的な三次元座標計測では、計測箇所となる身体各部にマーカーを貼付する。しかし、マーカーの貼付には時間を要するため、簡便

な計測には不向きである。また、時間をかけてマーカーを貼付しても、駆動フォームを阻害したり、漕ぐ動作により外れたりもするため、計測に対する被験者の負担は大きい。このように、計測の負担が大きければ、駆動フォームの評価・提案システムを構築しても活用することは困難である。マーカーを用いずに身体各部の三次元座標の取得が可能なセンサとして、ビデオカメラや深度センサなどが複合されたマイクロソフト社のKinect for Windows(以下、Kinect)がある。

Kinectはマイクロソフト社が販売していた家庭用ゲーム機の入力装置として開発されたものであるため、安価であり可搬性にも優れている。Kinectに内蔵されている深度センサで撮影された深度画像には、センサと各画素までの距離情報が格納されている。Kinectを用いると、この深度画像からKinectが推定した頭部や各関節といった身体各部の三次元座標を取得できる。また、本研究ではビデオカメラを用いて撮影した競技者の前顔面のカラー画像から、競技者が写っている画素数を、前面投影面積とする予定であったが、Kinectが撮影する深度画像を用いることで、競技者が写っている画素数よりも精度良く面積を推定できる可能性がある。そのため、本研究ではKinectを用いた前面投影面積及び三次元座標の計測システムの構築を試みた。

Kinectは家庭用ゲーム機器の入力装置として開発されたこともあり、いすや車いすに座った状態で前顔面を撮影した場合においては、頭部や肘、肩といった上半身の関節の推定された三次元座標の取得が可能である。しかし、競技者がレース用車いすを漕ぐ動作については、競技者を認識できず、身体各部の三次元座標は得られなかった。Kinectでは予め学習したデータを用いた人体形状認識により身体各部の位置を推定している。しかし、図1に示すように、競技者がレース用車いすを漕ぐときは、上体が著しく屈曲する。この屈曲した姿勢がKinectの想定を越えていたため、競技者を認識することができず、三次元座標が得られなかったと考えられる。

前面投影面積については、Kinectで撮影された深度画像は縦方向に320画素、横方向に240画素であり、視野角が垂直58.5度、水平45.6度であることから、深度毎に撮影される

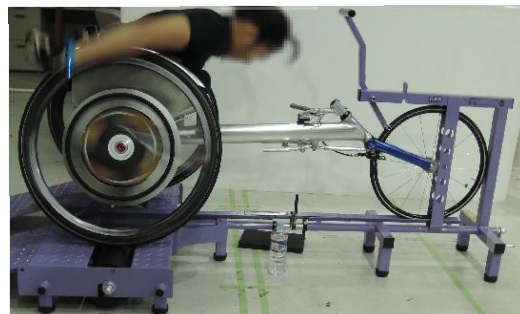


図1 ローラー台でレース用車いすを漕ぐ競技者

画像の面積を計算し、その画像全体の面積から各画素が占有する面積を深度毎に求めた。深度毎に求めた各画素の面積を用いて、我々は、指定した深度の範囲について画像の面積を算出するプログラムを作成した。

本研究では、Kinect を用いて身体各部の三次元座標及び前面投影面積を推定する計測システムの構築を試みた。開発したプログラムを用いて前面投影面積を推定することはできたが、Kinect から身体各部の推定された三次元座標を取得することは、本研究期間内ではかなわなかった。しかし、Kinect での計測は、従来の三次元動作解析装置を用いた計測に比べて簡便で被験者の負担が低減するため、撮影方向や撮影台数、また、撮影した画像の色情報などを加えて、競技者が車いすを漕いでいるときでも、頭部や肘及び肩関節などの特徴的な身体各部の三次元座標を推定できるようにすることが今後の課題である。

(2) 計測用ホイールの開発

本研究で開発した計測用ホイールはカーボン製 4 本バトン型ホイール (コリマ社) にハンドリムとその固定器具及びセンサやデータロガーなどの計測装置を取り付けたものである (図 2)。なお、ホイールのサイズは 700C である。

計測用ホイールでは、被験者が発揮する駆動トルクとホイールの角速度を計測し、駆動トルクと角速度からパワーを算出する。

本研究では、駆動トルクを、車いすを漕ぐときにハンドリムと固定器具を結ぶ 4 本の支柱に生じるせん断歪みの平均値から推定する。各支柱に生じるせん断歪みを計測するために、各支柱の内側と外側の両面に 2 軸歪みゲージ (共和電業、KFG-1-350-D16-23) を貼付し、支柱毎にブリッジ回路を構築した (図 3)。構築した各ブリッジ回路を並列に接続し、1つの歪みアンプに入力する。この歪みアンプの出力を本研究では平均せん断歪みとした。また、一般的な長さの支柱では、歪みゲージを貼付する場所の確保が困難であったため、一般的な長さよりも長い支柱を使用している。しかし、支柱を長くするとハンドリムと計測用ホイールの取り付け間隔も長くなってしまふ。これを避けるため、計測用ホイールにハンドリムを取り付けず、ハンドリムを取り付ける面の裏面に厚さ 3mm のアルミニウム製の円環をハンドリムの固定器具として計測用ホイールにボルトとナットで取り付け、その円環とハンドリムの各支柱の先端を同じくボルトとナットで固定している。

図 2 下段に示したように、ハンドリムの固定器具であるアルミニウム製の円環の内側に、ベニヤ板で作成した円環を配置している。ベニヤ板の円環は結束バンドで計測用ホイールに固定されており、その上に、歪みアンプ (共和電業、M11-0035) ホイールの角速



図 2 開発した計測用ホイール

ハンドリムと固定器具を結ぶ支柱 (歪みゲージの貼付箇所)



図 3 ハンドリムの支柱と歪みゲージの貼付箇所

度を計測するための角速度センサ (アナログ・デバイス、ADIS16266)、外部端末と Bluetooth Low Energy (以下、BLE) で通信を行うための無線モジュール (浅草ギ研、BLESerial2)、計測されたデータの保存先となる SD カード (東芝 FLASH Air W-03) 及びこれらの制御を行うマイコン (Arduino、Arduino pro mini 328) と電源となるモバイルバッテリー (パフアロー、BSMPB520P2) が配置されている。

平均せん断歪みを示す歪みアンプのアナログ出力はマイコンに内蔵されている 10bit の A/D コンバータを介してマイコンに入力される。歪みアンプの増幅率は 2000 倍、ローパスフィルタの遮断周波数は 100Hz とした。角速度センサが計測した角速度は、角速度センサによりデジタル化され、SPI 通信でマイコンに入力される。角速度センサの計測範囲と分解能は $\pm 3500\text{dps}$ と 1.04dps であり、それぞれ、周速度に換算すると $\pm 70\text{km/h}$ と

0.02km/h である。駆動トルクと角速度のサンプリング周波数は 200Hz とした。

マイコンはタブレット端末（ソニー、Xperia Z3 Tablet Compact）と BLE で接続することができ、計測の開始や停止といった制御はタブレット端末で動作する自作したソフトウェアを介して行う。計測中のマイコンは、0.25 秒毎に駆動トルクと角速度の平均値をタブレット端末に送信しており、自作したソフトウェアで両値の波形を確認可能である。また、自作したソフトウェアは、BLE で規定された Heart Rate プロファイルで通信可能な心拍計と接続できる。心拍計と接続した場合は、心拍計から取得した心拍数を駆動トルクや角速度と一緒に表示できる。また、取得した心拍数をマイコンに通知する（図 4）

マイコンは歪みアンプと角速度センサから得た計測値に加えて、計測値を取得した時刻及びマイコンから通知された心拍数を SD カードに記録する。

計測用ホイールの重量は 2.4kg であり、機器を取り付けたことで 1.2kg、両輪では 2.4kg の重量増加が生じている。

歪みアンプの出力波形に含まれるノイズについて

開発した計測用ホイールを用いて車いすを漕いだときに計測された歪みアンプの出力波形の 1 例を図 5 上段に示す。図 5 上段では、車いすを漕いだことで生じた周期的な出力波形の変化が確認できる。しかし、漕ぎ始めと漕ぎ終わりで基線も変化することが確認できる。この基線の変化については、例えば、非線形的な信号処理によって、漕ぎ始めと漕ぎ終わりで基線が変化していた場合は、漕ぎ始めの基線となるように漕ぎ終わりの基線を補正することは可能である（図 5 下段）。しかし、基線の変化がどの時点でどの様に生じたかが不明であるため、非線形的な信号処理により基線が調整された値から算出された駆動トルクの信頼性は乏しい。

本研究では、この基線の変化が電気回路の配線や歪みアンプなどの固定方法によるものと考え、配線や固定方法の見直しを繰り返したが、静的な負荷では基線の変化は再現できず、車いすを漕ぐと生じることが繰り返された。しかし、研究期間の最終年度の 2 月に、ハンドリムと固定器具が仮止め状態でハンドリムに負荷を加えてしまったところ、ハンドリムと固定器具の相対的位置関係がわずかにずれると同時に、基線の変化が生じることが確認された。このことから、我々が考えていた配線や器具の固定方法といった電気的な要因が基線変化の原因ではなくハンドリムと固定器具の固定方法に原因があることが推定された。具体的には、歪みゲージを貼付しているハンドリムの各支柱の先端と固定器具は、それぞれ、ボルトとナットで

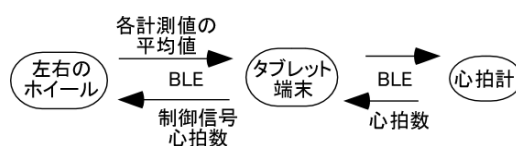


図 4 信号の流れ

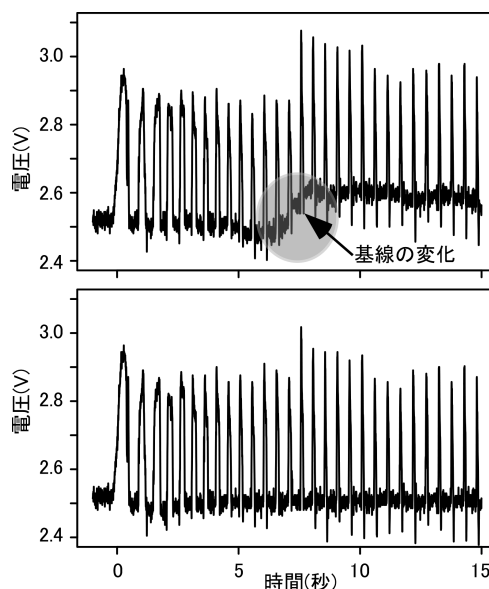


図 5 歪みアンプの出力波形

締結しているが、ボルトを通す、それぞれの穴は、ボルトの径よりもわずかに広いため、ナットで締め付けることで支柱の先端と固定器具の穴がずれないようにしている。我々が加えた静的な負荷では、ナットの締め付けにより、支柱の先端と固定器具の穴にずれは生じなかったが、車いすを漕ぐときに生じるような瞬間的に大きな負荷では、支柱と固定器具の穴にずれが生じ、その結果、各支柱に歪みが生じたと考えられる。また、漕ぐときに手が触れた箇所に近い支柱ほど、支柱と固定器具に生じるすれが大きくなるため、支柱に生じる歪みも手が触れた箇所に近い支柱ほど大きくなると考えられる。また、漕ぎ終わったときには、各支柱は生じた歪みを解消しようとするので、支柱と固定器具の穴のずれは元に戻ろうとする。しかし、車いすを漕いだときに生じるほどの瞬間的に大きな負荷ではないため、ナットの締め付けにより、支柱の先端と固定器具の穴に生じたずれは完全には解消されず、各支柱には不均一な歪みが残った状態となる。この各支柱の不均一な歪みが、漕ぎ始めと漕ぎ終わりで基線が変化する原因であると考えられる。従って、各支柱と固定器具の穴にずれが生じないようにすることが、基線の変化に対する対策になると考えられるが、研究期間内での解決には至らなかった。

そのため、本研究では、駆動トルクを支柱の歪みから直接的に計測するのではなく、計測ホイールの角速度を用いて推定し、駆動フォームを評価することを試みた。

計測用ホイールを用いて測った角速度による駆動フォームの評価

駆動トルクは、車いすを漕ぐときにハンドリムの支柱に生じる歪みからではなく、ホイールの慣性モーメントと角加速度の積から求めることが可能である。しかし、路面を直進しているときは左右のホイールの角速度と角加速度は同じであるため、支柱の歪みではなく慣性モーメントと角加速度の積から求めた駆動トルクでは、駆動フォームによって競技者が発揮したパフォーマンスの評価は可能であるが、左右の駆動フォームの違いを評価することは困難である。

我々は、駆動フォームの左右差を評価するために、左右のホイールが独立して回転できる2本ローラー台を用いた。2本ローラー台では、ホイール毎に独立して回転するローラーがあるため、左右のホイールが独立して回転することが可能となる(図6)。計測で用いた2本ローラー台は、我々が本研究とは異なる研究で開発したものであり、各ローラーの直径は0.15mである。

駆動フォームを評価した被験者は2名(以下、Subj.1とSubj.2)であり、車いすマラソンにおけるクラスは、国際クラス分け基準に基づくと両名ともにT53である。また、両名とも駆動フォームに左右差があると考えている。また、心拍計としてリストバンド型脈拍計(エプソン、PLUSENSE PS-100)を用いた。

駆動フォームの評価は、被験者は2本ローラー台で停止した状態から最大努力で加速を行い、そのときに計測された左右のホイールの角速度から実施した。

計測した角速度は、平滑化スプラインを用いてノイズの低減と角加速度の算出を行う。平滑化スプラインの計算は統計処理ソフトRのstatsパッケージに含まれているsmooth.spline関数を用いた。smooth.spline関数の引数は、nknots以外は初期値を用い、nknotsは探索的に求めた値である計測した角速度のデータ数の1/20とした。算出した角加速度に、ローラーと計測用ホイールの慣性モーメントの和を乗算した値をトルクとして求めた。また、トルクと角速度の積からパワーを求めた。ローラーと計測用ホイールの慣性モーメントは実測値である $0.26\text{kg}\cdot\text{m}^2$ と $0.14\text{kg}\cdot\text{m}^2$ を用いたので、慣性モーメントの和は $0.40\text{kg}\cdot\text{m}^2$ となる。

一漕ぎ毎の評価を行うために、角速度から各漕ぎの漕ぎ始めと漕ぎ終わりの時刻を推定した。具体的には、角速度が増加し始めた箇所を漕ぎ始めの候補時刻、減少し始めた箇所を漕ぎ終わりの候補時刻とし、これらの候補時刻に駆動周期といった情報を勘案し、最終的には目視で漕ぎ始めと漕ぎ終わりの時刻を決定した。なお、漕ぎ目の漕ぎ始めについては、ホイールの周速度が 0.4km/h を越えた時刻とした。

計測結果の1例を図7に示す。図7はSubj.1



図6 計測で用いた2本ローラー台

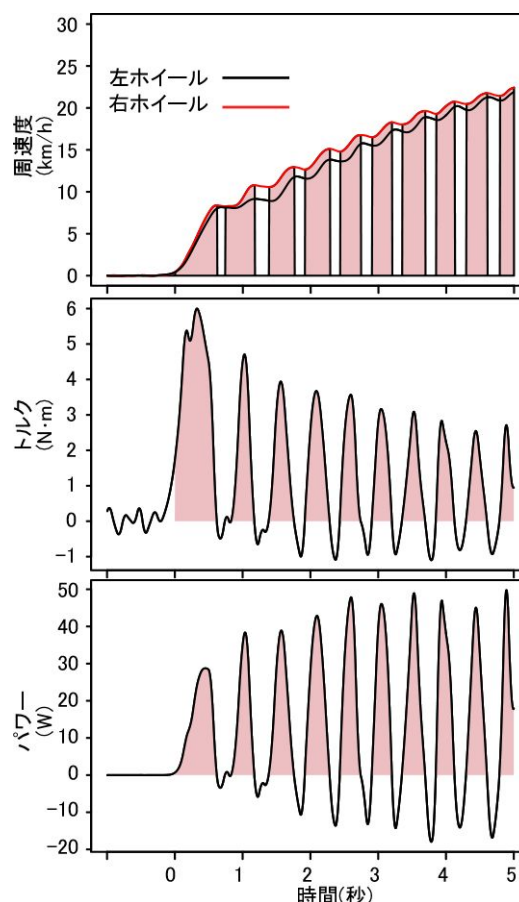


図7 計測結果の1例

の計測結果の1例であり、図7上段は左右のホイールの周速度を、中段は右ホイールの角加速度と慣性モーメントの和の積を、下段は右ホイールの角速度と中段で示した波形の積である。中段と下段の波形は、被験者が漕いでいる区間では、それぞれ、駆動トルク及びパワーと見なすことができる。上段の右ホイールの波形及び中段と下段で薄く塗られている箇所は、右ホイールの角速度から求めた被験者が漕いでいると推定される区間である。

左右の駆動フォームの評価として一漕ぎ毎に被験者が行った仕事としてパワーの積算値を左右毎に求め、その割合を算出した。図8にSubj.1の結果を示す。Subj.1はクッションを利用した駆動フォームの改善に取り組んでおり、図8上段はクッションを利用

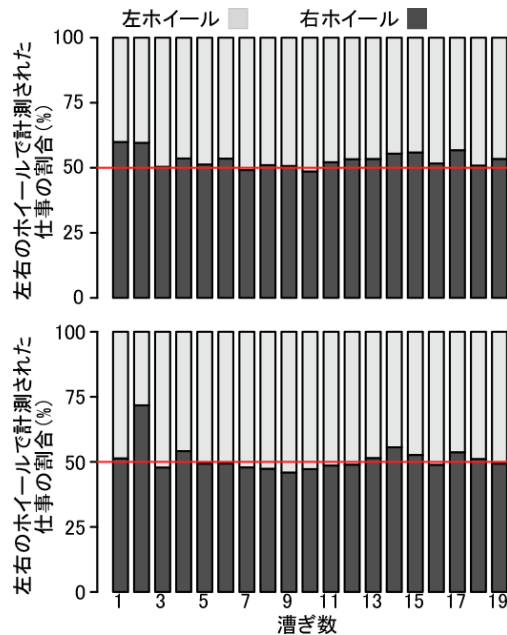


図8 左右のホイールで計測された一漕ぎ一漕ぎにおける仕事の割合

しなかったときの、図8下段はクッションを利用したときの結果である。左右で行った仕事に対して右側が行った仕事の割合の平均値は、図8上段では53.2%で、右側のほうが仕事を行っているが、被験者が考えていたほどの差ではなかった。図8下段の平均値は51.2%となっており、左右の割合が2ポイント改善している。このことは、Subj.1が取り組んでいるクッションを利用した駆動フォームの改善が左右差の改善という観点からは有効であることを示しており、また、本研究では開発した計測用ホイールを用いると駆動フォームの改善効果を定量的に評価できることを示している。

また、図8下段では2漕ぎ目において、その他の漕ぎとは異なり、右側が行った仕事の割合が高くなっている。これは、左のホイールでハンドリムを掴み損ねたり、ハンドリムを送り損ねたりといった何らかの駆動ミスが生じたことを示唆している。開発した計測用ホイールを用いると、このような駆動ミスが生じた漕ぎ数や回数を客観的に数値として競技者にフィードバックすることも可能となる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計1件)

- 中村俊哉、原良昭、赤澤康史、中川昭夫、川口清隆、椋本哲次、野口幸弘、増田和茂、レース用車いすにおけるホイールの回転速度の可視化、日本障がい者体育・スポーツ研究会研究紀要、査読なし、第39集、pp.17-18,2016.

[学会発表](計3件)

- 中村俊哉、車いすマラソン競技者の競技力向上を目標とした駆動トルク計測用ホイールの試作、第30回リハビリ工学カンファレンス in おきなわ、2015年11月13日、沖縄県総合福祉センター(沖縄県那覇市)
- 中村俊哉、レーサー用車いすにおけるホイールの回転速度変動の可視化、第39回日本障がい者体育・スポーツ研究発表会、2015年10月3日、広島市中心身障害者福祉センター(広島県広島市)
- 中村俊哉、レース用車いすのためのトレーニング用電動式ローラー台の開発、第29回リハビリ工学カンファレンス in ひろしま、2014年8月26日、広島国際大学呉キャンパス(広島県呉市)

[図書](計0件)

[産業財産権]

出願状況(計0件)

取得状況(計0件)

[その他]なし

6. 研究組織

(1)研究代表者

中村俊哉(NAKAMURA, Toshiya)

兵庫県立福祉のまちづくり研究所・その他部局等・技師

研究者番号: 20426547

(2)分担研究者

(3)連携研究者

中川昭夫(NAKAGAWA, Akio)

神戸学院大学・総合リハビリテーション学部・教授

研究者番号: 50411872

原良昭(HARA, Yoshiaki)

兵庫県立福祉のまちづくり研究所・その他部局等・研究員

研究者番号: 00426545