

東京電機大学

博士論文

把持アプローチの計画にもとづく  
義手の最適な関節構成の分析

Analysis of upper limb prosthetic's optimal joint composition  
based on grasping approach planning

2021年3月

樋口 凱

## 要旨

従来の義手の設計・評価は、ロボットハンドの把持形態数にもとづく設計・評価論を転用したものであるが、手先具機能のみの設計方法であるため、手継手などの関節機能については適切な評価ができず、義手使用者の残存関節による代償動作を軽減するための義手設計は不可能であった。そこで本研究は、対象物への上肢アプローチの分析に着目して、手先具機能と姿勢制御の関係から抽出した特徴にもとづき、手先具機能と手継手機能を同時かつ等価に評価可能な指標を新たに作成し、前腕義手の最適な関節構成を求めた。

はじめに、手先具の機能の優先順位を確認することを目的として、健常者3名の胸部に高画角ビデオカメラを装着し、日常生活で出現する手の動作の出現回数と出現時間を抽出した。結果、回数・時間共に把持が多かったことから、最も重要な手先具機能が把持であるとした。また、1回あたりの継続時間が短い把持の頻度が多いことから、本研究は把持に至るまでの動作の分析にもとづいた義手の関節構成の構築を行うこととした。

把持に至るまでの時間について、日常生活記録にて出現回数の多かった缶、ペン、ノートを対象に、健常手と既製の手先具を用いた模擬筋電義手にて計測、比較した。結果、健常手は全ての対象物において2s以下で把持したのに対し、模擬筋電義手は缶とペンに3s程度、ノートには4s以上を費やした。ノートの把持を追加で計30回まで把持を繰り返し、習熟による把持遂行までの時間の短縮を検証したが、対数近似による習熟予想では3s程度までの短縮にとどまった。これ以上の時間短縮を行うためには、残存関節による代償動作を軽減することが必要であると考察した。

そこで、日常生活に寄与できる義手の関節構成の分析のために、健常者の日常生活中における座位中の机上把持における把持アプローチを記録した。前腕義手において把持アプローチを構築する部品である手継手と手先具の機能について同時かつ等価に評価可能な指標として、体幹および前腕と手の相対姿勢関係を示す把持方向による分類を新たに定義した。肘関節以遠の関節構成ごとに実現可能な把持方向を導出し、日常生活での机上把持における各把持方向の出現回数割合から、机上把持への把持方向寄与率を算出した結果、撓尺屈機能を付与したフック型手先具と同等の条件にすることで、机上作業において出現する把持方向の95.9%に対応することを確認した。既製の回内外機能のみの手継手を使用する場合は、フック型手先具と同じ把持方向を有する手先具を使用することで、机上作業における把持方向の80.1%に対応することを確認した。また、既製のハンド型手先具とフック型手先具の評価では、第1指の姿勢変更機能を有するハンド型よりも指の姿勢変更機能がないフック型手先具の方が机上把持方向寄与率が高いことを確認した。この結果は、義手使用者による手先具ごとの作業能力の比較結果と合致している。

最後に、模擬筋電義手を用いて、フック型手先具と同等の条件にしたハンド型手先具と既製の部品を使用したハンド型手先具について、缶、ペン、ノートの把持遂行までの時間を計測し、比較した。結果、把持方向の違いが影響する対象物であるペンの把持においてフック型手先具と同

等の条件にした手先具の方が短時間で把持できることを確認した。以上により，把持方向が把持作業に及ぼす影響が確認され，机上把持方向寄与率による義手の設計・評価の効果を確認した。

## Abstract

The conventional prosthetic hand design methods and evaluations follow the flow of design methods and evaluations based on the increasing the number of grasping forms as in humanoid hand. However, due to the design method that targets only terminal device function are not able to properly evaluate the joint function such as wrist unit. This design criteria misleads to design prosthetic hands that are not capable of reducing compensatory movements and may lead to enhancing the use of the remaining joints of amputee. Therefore, in this research, based on the analysis of the upper limb approach to the object, a new index was created to evaluate terminal device function and wrist unit function simultaneously and equivalently. Then, based on the index, the optimum joint composition of transradial prosthesis was obtained.

First, to confirm the priority of terminal device function, a wide-range fisheye-lens video camera was attached to the chest of three able-bodied subjects and recorded through the day. The number of times of appearance and duration time of hand tasks were extracted. As a result, grasp was the largest category in both the number of times and duration time, thus, the most important function of terminal device is grasp. Furthermore, the short duration grasp was most frequent. The goal was set to find a joint configuration expanding the adjustability for grasp task for transradial prosthesis, based on this result from daily activity motion analysis.

The times to grasp can, pen, and notebook, which were the most frequently appeared object in daily life log, were measured using a simulated transradial myoelectric prosthetic hand with an off-the-shelf terminal device. The measurements were compared to sound hand. As a result, the sound hand grasped all objects in less than 2 seconds, while the simulated myoelectric prosthesis took approximately 3 seconds for a can and pen, and more than 4 seconds on a notebook. Following this, grasping trial of a notebook was continued up to 30 times for proficiency, and verified the shortening boundary time. With the logarithmic approximation proficiency prediction, the time converged to approximately 3 seconds. Further reduction in time requires a reduction in compensatory movements by the residual joints.

Therefore, to analyze the joint configuration of the prosthetic hand that is able to contribute to daily life, the grasping approach during desk grasping in a sitting position during daily life of an able-bodied person was recorded. As an evaluation index of the functions of terminal device and wrist unit, which are the parts that construct the grasping approach in transradial prosthesis, the classification by the grasping direction showing the relative posture relationship between trunk and forearm and hand was newly defined. The grasping directions that be able to be realized for each joint configuration distal to elbow joint were derived. Then, grasping direction contribution ratios was calculated from the appearance frequency ratios of each grasping direction in daily desk grasping. The terminal device such as the hook-type with radial/ulnar flexion function realizes 95.9% of the desk grasp direction. In the case of using an off-the-shelf wrist unit with only



pronation/supination rotation function, the terminal device with the same grasping direction as the hook type achieves 80.1% desk grasping direction. In addition, by evaluating off-the-shelf hand-type and hook-type terminal devices, the contribution of the desk grasping direction is higher for the hook-type than for the hand type with the thumb posture change function. This result is consistent with the results of the comparison of the working ability of each terminal device by the prosthetic hand users.

Finally, using a simulated transradial myoelectric prosthetic hand, the time required to complete grasping a can, pen, or notebook was measured and compared between an off-the-shelf hand-type terminal device and a hand-type that was designed to be in the same grasping direction as the hook-type. As a result, In the case of the pen, the grasping of the terminal device with the same grasping direction as the hook type took less time than that of the off-the-shelf terminal device. From the above, these results suggest the influence of grasping directions on grasping tasks and the effect of the design and evaluation of the prosthetic hand by the contribution ratio of the desk grasping direction.

# 目次

<b>第1章 序論</b> .....	<b>1</b>
1. はじめに .....	2
2. 従来の前腕能動義手の設計方法 .....	4
2.1 把持形態による分類 .....	4
2.2 関連研究 .....	5
3. 前腕義手における課題 .....	5
3.1 把持アプローチと代償動作 .....	5
3.2 義手設計の課題 .....	7
4. 本研究の目的 .....	7
5. 論文構成 .....	8
<b>第2章 義手機能構築のための対象動作選択</b> .....	<b>10</b>
1. 日常生活において優先される手先具機能の考察 .....	11
1.1 実験目的 .....	11
1.2 方法 .....	11
1.2.1 対象者 .....	11
1.2.2 記録方法 .....	11
1.2.3 分析方法 .....	12
1.3 結果 .....	13
1.4 考察 .....	14
1.4.1 作業を行う手の左右について .....	14
1.4.2 手部の動作の優先度について .....	15
1.4.3 義手設計において対象にする把持について .....	16
2. 既製の義手による把持遂行時間 .....	16
2.1 実験目的 .....	16
2.2 方法 .....	17
2.2.1 使用機器 .....	17
2.2.2 実験手順 .....	19
2.3 結果 .....	19
2.4 考察 .....	20
<b>第3章 把持方向による分類と考察</b> .....	<b>22</b>
1. 把持アプローチの計画 .....	23

2. 把持方向による分類.....	24
2.1 把持方向の概要.....	24
2.2 手部把持方向.....	24
2.3 前腕座標系.....	26
2.4 体幹座標系.....	26
3. 体幹座標系把持方向と前腕座標系把持方向寄与率の関係.....	28
3.1 肩・肘関節の作用.....	29
3.2 義手の作用.....	30
3.2.1 手継手軸の作用.....	30
3.2.2 手先具把持方向の作用.....	31
4. 日常生活における把持方向出現回数の抽出.....	32
4.1 目的.....	32
4.2 方法.....	32
4.3 結果.....	32
4.4 考察.....	33
5. 把持方向寄与率にもとづく義手機能選択.....	34
5.1 義手の有する把持方向寄与率にもとづく義手機能選択.....	34
5.1.1 概要.....	34
5.1.2 計算結果.....	34
5.1.3 考察.....	38
6. 市販の義手部品を組み合わせた前腕義手の評価.....	38
7. 把持方向寄与率にもとづく義手機能選択.....	39
<b>第4章 把持実験による提案機能の評価.....</b>	<b>42</b>
1. 目的.....	43
2. 方法.....	43
2.1 実験手順.....	43
2.2 使用機器.....	44
2.3 分析方法.....	46
3. 結果.....	46
4. 考察.....	47
<b>第5章 結論.....</b>	<b>50</b>
<b>謝辞.....</b>	<b>52</b>
<b>参考文献.....</b>	<b>53</b>

研究業績 ..... 56  
付録 ..... 57

## 目次

図 1	フック型手先具 Hosmer #5X Hook (fillauer 社)	3
図 2	ハンド型手先具	4
図 3	Schlesinger の把持形態分類 <sup>14)</sup>	5
図 4	上肢の関節構成	6
図 5	机上のペンを把持する際の肢位の比較	6
図 6	左：高画角ビデオカメラ*, 右：装着図	12
図 7	記録された映像	12
図 8	手の動作の分類	13
図 9	1日の作業場所の遷移例 (各項目の幅は作業場所の時間割合準拠)	14
図 10	左：各動作の出現時間割合, 右：各動作の出現回数割合	14
図 11	作業に参加した手の左右の回数割合	14
図 12	動作 1 回あたりの時間	15
図 13	把持 1 回あたりの継続時間の分布	16
図 14	2つのセンサが検出する鉛直方向の力の時間変移例と把持遂行時間	17
図 15	模擬筋電義手	18
図 16	左：3軸力センサ (T40S1-WM155-K1-P1A-C100), 右：センサ配線図	18
図 17	簡易フォースプレート (アクリル板)	18
図 18	机上の実験機器配置図	19
図 19	各条件の把持遂行時間と義手によるノート把持の習熟予想	20
図 20	健常者と前腕義手使用者の把持動作の比較	21
図 21	健常者の把持アプローチ	23
図 22	前腕切断者の把持アプローチにおける義手関節部分と関節構成の例	23
図 23	手部把持方向の定義	25
図 24	前腕座標系	26
図 25	前腕座標系把持方向	26
図 26	体幹座標系把持方向に付する把持位置情報の基準	27
図 27	体幹座標系	27
図 28	体幹座標系把持方向	28
図 29	肩・肘関節による肢位変更による複数の体幹座標系把持方向の実現	30
図 30	DMC ハンドは 1 軸で 1 つの把持方向を有する	31
図 31	フック型手先具は 1 軸で 2 つの把持方向を有する	31
図 32	左：把持方向 $i\text{-YZ}(y)_T$ の例, 右：把持方向 $i\text{-XY}(y)_T$ の例	33
図 33	手継手 z 軸回転の $\text{YZ}(y)_A = \text{ZX}(x)_A$	38
図 34	隣接する把持方向面上で直交する把持方向軸を有する条件	41
図 35	$\text{YZ}(y)_A + \text{ZX}(x)_A = \text{XY}(y)_A + \text{ZX}(z)_A$ の実現例	41
図 36	実験に使用した対象物 (缶, ペン, B5 ノート)	44
図 37	机上の対象物と手先初期位置 (mm)	45

図 38	アタッチメントを装着した DMC ハンド（既製条件） .....	45
図 39	第一指アタッチメントを装着した DMC ハンド（提案条件） .....	45
図 40	アタッチメントの指腹側形状は DMC ハンドと同様 .....	45
図 41	各マーカ高さの変移と把持遂行時間 .....	46
図 42	既製条件と提案条件の模擬筋電義手による把持遂行時間 .....	47
図 43	ペンの把持作業において既製条件でのみ出現した代償動作 .....	48
図 44	ペンの把持作業中の肘頭の高さ .....	48
図 45	ペンの把持作業における肘頭の最高位置（中央値） .....	49

## 表目次

表 1	各前腕座標系把持方向が実現できる体幹座標系把持方向 (MAP) .....	30
表 2	各体幹座標系把持方向の出現回数割合 (%) .....	33
表 3	前腕座標系把持方向寄与率 (%) .....	33
表 4	手部把持方向 1 種かつ手継手回転軸 1 種の机上把持方向寄与率 (%) .....	35
表 5	手部把持方向 1 種かつ手継手回転軸 2 種の机上把持方向寄与率 (%) .....	36
表 6	手部把持方向 2 種かつ手継手回転軸 1 種の机上把持方向寄与率 (%) .....	37

# 第 1 章 序論



## 1. はじめに

わが国における上肢切断者・児数は、厚生労働省が行った調査から、2001年で99400人<sup>1)</sup>、2006年で82300人<sup>2)</sup>となっている。減少してはいるものの依然多くの上肢切断者が生活しているのが現状である。なお、2006年以降の調査では、障害・切断種別の統計ではなく肢体不自由でまとめて計上されているため、近年の上肢切断者数の推移についての継続的かつ体系的な調査は報告されていない。上肢の切断レベルについて、Dillinghamらはアメリカ合衆国メリーランド州の15年分(1979-1993年)の病院のデータを分析した研究<sup>3)</sup>で対象地域の人口に対する上肢切断の年間発生率が調査され、above elbowの切断は10万人あたり0.04人、below elbowの切断は10万人あたり0.08人であると報告されている。

事故や病気で上肢を失った場合、上肢の機能を補うためには義手を使用する必要がある。外観のみを補う装飾用義手と随意的に動作を補うことのできる能動義手があるが、その選択は切断レベルによって違いがある。手部切断者や指切断者の大部分は装飾用義手を選択するが、上肢切断者や前腕切断者の場合は能動義手を選択する割合が増加する。前述の切断レベルの割合に準ずると、能動義手の需要が多いのは前腕義手であると考えられる。したがって、本研究は前腕義手に着目することとした。

従来の能動義手はヒトの機能の完全再現に至らないばかりでなく、義手を装着することで残存能力を制限し、訓練なしでは代償動作の多用によって疲労や関節の過剰使用が生じる。上肢切断者が能動的に動かせる義手は、鉤状の手先(フック型手先具)とヒトの手の外観の手先(ハンド型手先具)に大別され<sup>4)</sup>、作業への対応においてはHosmer #5X Hook (fillauer社)(図1)などのフック型手先具が優れていることを使用経験者や義手に携わる医療関係者は知っている。しかし、わが国においては心理的にフック型手先具の採用を避けることが多く<sup>5)</sup>、作業への対応が劣り重量のあるハンド型手先具も採用せずに、外観のみを補う装飾用義手を選択されることが多い<sup>6)</sup>。しかし、陳ら<sup>7)</sup>や梶谷ら<sup>8)</sup>が述べるように、作業への対応に優れるハンド型手先具のニーズは、決して少なくないのが現状である。

能動義手はワイヤ牽引や、筋電信号とモータによって使用者の意のままに作業できるようになることに価値がある。これに対し、従来の義手設計方法は、ロボットハンドの把持形態数にもとづく設計・評価論を転用して、手先具の把持形態数を増やすことで作業の対応範囲を広げようとした。市販されている電動ハンドは、DMC Hand (ottobock社)(図2上)やsensor hand speed (ottobock社)を代表とする手先の開閉機能のみの1自由度のハンドから、第1指の対立姿勢の変更機能などを追加した多自由度のハンドへと変遷していつている。市販されている多自由度のハンドには、bebionic hand (ottobock社)(図2左下)やi-limb (Össur社)(図2右下)などがあり、これらは複数の把持形態数の実現を目的とした手先具である。ottobock社のDMC hand, sensor speedは外観および開閉機構は同じで、開閉制御の違いでシリーズ分けされている。1自由度で3指のMP関節のみが作動し、MP関節からDIP関節までは連結されている。ottobock社の

Michelangelo hand はモータによって第 1 指が肢位変更可能であり，対立位から第 2 指の側面との対立（ラテラルピンチ）への移行が可能である．第 2～5 指は MP 関節のみが作動するが，屈曲するに従って指間が狭まることで，指間把持も可能である．また，他動的に掌背屈が可能である．Össur 社の i-limb は，五本の指それぞれにモータを内蔵しており，対象物の形状に沿った把持が可能である．第 1 指はモータや手動での内外転が可能であるため，第 2 指や第 3 指との対立だけでなく，第 2 指の側面との対立が可能である．シリーズのフラッグシップである i-limb quantum は，最大 36 種の肢位から事前に使用する肢位を登録し，ジェスチャーや筋活動，スマートフォンアプリ，作業環境に設置した Bluetooth チップによって肢位変更可能な手先具である．しかし，これら多自由度のハンドが登場したにも関わらず，すべての能動義手使用者が多自由度のハンドに移行したわけではない．また，Niet Van Der ら<sup>9)</sup>や Dalley ら<sup>10)</sup>は，義手使用者による把持実験を行い，多くの把持形態を有しているはずの i-limb quantum が，把持形態を 1 つしか有さない DMC Hand に劣る結果であったと報告している．このことから筆者は，把持形態の数で義手機能の設計をする従来の方法に課題があるのではないかと考えた．Childress ら<sup>11)</sup>は，使用者の意のままに作業できる義手について，次の 7 項目を条件に挙げている．(1) low mental loading or subconscious, (2) user-friendliness, (3) independence in multifunctional control, (4) simultaneous and coordinated control of multiple functions, (5) near-instantaneous response, (6) noninterference with the individual's remaining functional abilities, (7) a natural appearance and quiet movement. このうち，(1)-(5)は義手の作業において健常手に比べて余計にかかる手間について述べている．本研究では，多自由度のハンドが採用されない理由がこれらの手間にあるとして，把持形態以外にも義手機能の設計において重要な要素があると考えた．



図 1 フック型手先具 Hosmer #5X Hook (fillauer 社)

<https://fillauer.com/products/hosmer-5x-hook/>



図 2 ハンド型手先具

上：DMC Hand

左下：bebionic hand, 右下：i-limb quantum

[https://www.ottobock.co.jp/prosthetic\\_ue/myoelectric/myo\\_system/8e38/](https://www.ottobock.co.jp/prosthetic_ue/myoelectric/myo_system/8e38/)

<https://www.ottobockus.com/prosthetics/upper-limb-prosthetics/solution-overview/bebionic-hand/>

<http://www.p-supply.co.jp/ossur/catalog/touch-bionics>

## 2. 従来の前腕能動義手の設計方法

### 2.1 把持形態による分類

手の形をした多自由度の手先具は外観が良く、様々な形態を選択的に再現することができる。手先具の機能の開発の優先順位は、目標とする作業に基づいている必要があり、特定の作業について手の動きを分析する研究がされてきた。それらの研究は、作業にて使用された手の形状を分析したものであり、本研究ではこの方法を「把持形態による分類」と称した。

## 2.2 関連研究

手先具設計時の機能の優先順位は目標とする作業に適合し作業頻度に基づく必要があるとして、ロボットハンドの設計指針を定めることを目的に Bullock ら<sup>12)</sup>は家政婦と機械工作工員を対象に仕事手の動きを記録した。また、Kousaka ら<sup>13)</sup>は健常者の手の動きを一日中記録した中から cooking, lunch, shopping, driving a car, working with a PC を抽出して利き手と非利き手の使い方を分析した。職業に特定された作業や手の動きについての記録分析であり、作業用義手には有用であるが、上肢切断者が身の回りのことをする日常生活動作に適した義手に求められる動作ではない。

ロボットハンドや義手ハンドの設計・機能評価に Schlesinger<sup>14)</sup>の6種類の把持形態分類が用いられる事例が多く、把持形態の全て、あるいは一部を達成課題と設定し議論がなされている<sup>15-19)</sup>。この他に、Napier<sup>20)</sup>, Landsmeer<sup>21)</sup>, Kamakura ら<sup>22)</sup>, Cutkosky<sup>23)</sup>, 大西ら<sup>24,25)</sup>, Parry ら<sup>26)</sup>, Dollar<sup>27)</sup>による研究などがあるが、いずれの分類も手の使用形態に限られ、作業において重要となる手の姿勢制御に関わる手関節を含んだ分類や分析ではない。

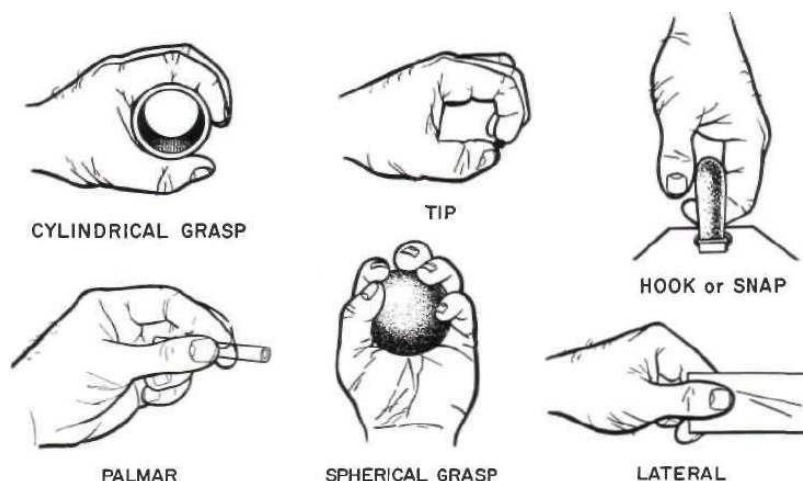


図 3 Schlesinger の把持形態分類<sup>14)</sup>

## 3. 前腕義手における課題

### 3.1 把持アプローチと代償動作

本研究では、手部を把持対象物に対して適切な位置、姿勢に配置するための関節角度構成を把持アプローチと称した。健常者の上肢による把持アプローチは、肩関節、肘関節、前腕、手関節、手部によって構成される<sup>28)</sup>(図 4)。健常者は手指のみの肢位変更で多様な把持形態が可能であるため、手関節以近の肢位変更を伴わずに様々な対象物に対応することも可能である。一方、前腕義手使用者は肘関節以近の機能は残存しているが、前腕と手関節の機能は手継手、手部は手先

具が担っている。しかし、手先具はヒトの手指機能の完全再現には至っておらず、把持形態は第1指と第2指による指腹つまみ、側面つまみ、もしくは四指による指間つまみに限られるため、手先具が把持できる方向は手先具自体の姿勢に大きく依存する。手継手も重量や長さの制限があり、3種の回転軸（回内外、掌背屈、撓尺屈）全てを付与することは容易ではなく、健常者の手関節機能を完全再現することはできていない。結果、前腕義手使用者の把持アプローチにおいて、不完全な手指機能と手関節機能を生体の肩関節と肘関節が補完せざるを得なくなり、作業に本来必要ない運動や肢位、即ち代償動作が発生する<sup>28-30)</sup> (図5)。代償動作の不自然な外観は特にハンド型手先具の審美的優位性を損ねるため、代償動作が必要であると判断した把持に対して義手使用を躊躇することにつながり、義手を装着しているにも関わらず健常手の肉体的負担が増加することが課題となっている。

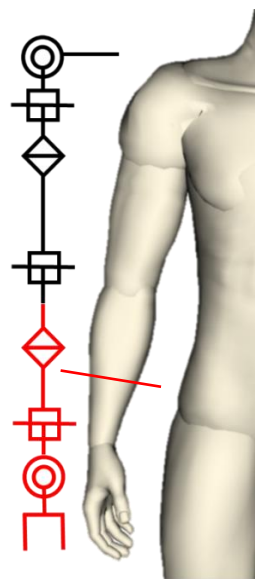


図4 上肢の関節構成  
赤部分は前腕切断者が失っている機能

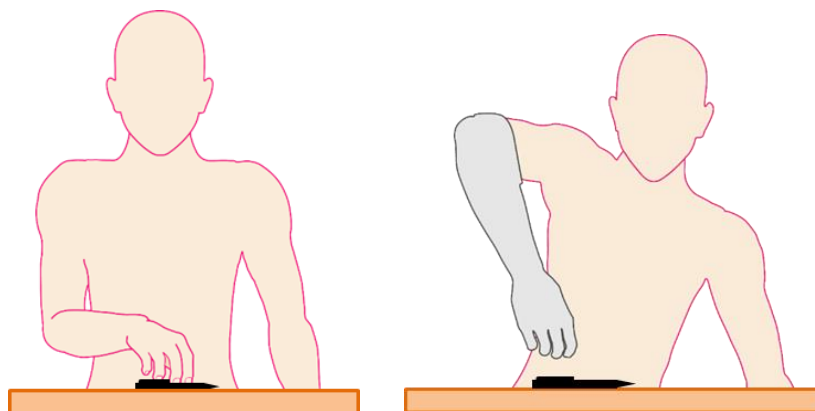


図5 机上のペンを把持する際の肢位の比較  
左図：健常者，右図：前腕義手使用者

## 3.2 義手設計の課題

代償動作を抑制するために、前腕切断者が失った肘関節以遠の機能である前腕および手関節機能と手部機能を補うことが重要である。したがって、各義手部品的设计や選択は互いの機能の補完を考慮する必要があるが、従来において義手の設計要件とされる把持形態の再現は作業中の手部の形状に注目した分類方法にもとづく目標であるため、前腕および手関節機能や肘関節、肩関節との協調については考慮できない。手先具機能と手継手機能について同時かつ同じ重みで評価可能な指標がなく、義手に付与する機能の選択基準がないのが現状である。義手部品の選択、組立は経験則や重量制限などに基づいており、義手の適合評価は義手使用者による作業評価で行っている。

義手部品もしくはそれらの組み合わせの評価は、義手使用者の技量や作業手順が影響因子として含まれた定性的評価であり、義手部品の機能評価ではないため、部品の改善課題が明確ではない。特に、作業にて出現する代償動作に対して、義手機能の選択による解決策が議論できない。なお、筆者の過去の研究<sup>3)</sup>で手部の作業（把持や突起形成系など）とその時の前腕および手関節の肢位を記録し、義手における手継手機能の付与優先順位を考察した。この研究は、作業と手継手機能の組み合わせについての考察を行っており、手部機能と前腕および手関節機能についての補完関係は考察できていない。

## 4. 本研究の目的

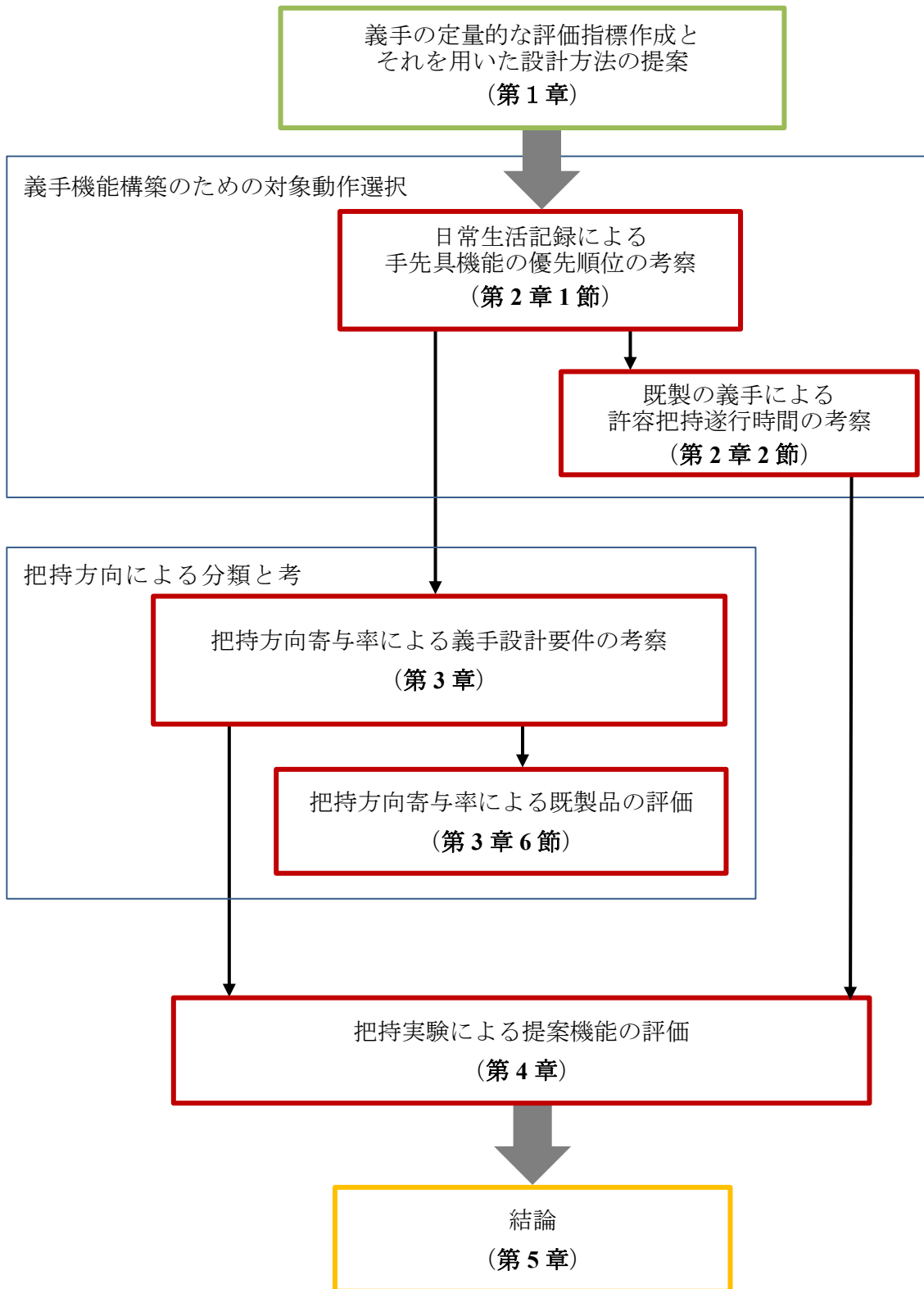
把持アプローチにおける代償動作を抑制するための義手機能の補完に着目し、手先具機能と手継手機能について同時かつ同じ重みで評価可能な定量的な指標を作成することで、義手に優先して付与すべき機能を考察することを目的とした。

本研究により以下の事柄を新たに得ることを期待した。

- ・把持アプローチの計画を用いた分類方法。
- ・手先具機能と手継手機能について同時かつ同じ重みで評価可能な指標。
- ・日常生活の記録の分析による義手の関節構成の導出。
- ・使用者の残存関節の代償動作に対する義手の関節構成の構築による抑制。
- ・義手使用者個人の力量に因らない数値を用いた義手の評価。

## 5. 論文構成

本論文は、本章で述べた課題と目的をもとに、義手機能選択の基準となる指標を複数用いて、機能数比で効率の良い能力を有する義手の設計を考察した。第2章では義手が必要とする手先の機能について日常生活動作の記録から抽出し、義手機能構築のための対象動作を選択した。第3章では、第2章にて選択した対象動作について分析し、過大な代償動作をせずに義手に求められる動作を実現するための機能選択方法として把持方向を用いることで、手継手機能と手先具機能の組み合わせについて考察した。第4章では、第3章にて提案した手継手機能と手先具機能の組み合わせについて、模擬筋電義手を用いた対象物把持実験にて、把持方向が把持作業に与える影響を調査し、比較した。第5章にて結論を述べた。





## 第 2 章 義手機能構築のための対象動作選択

## 1. 日常生活において優先される手先具機能の考察

### 1.1 実験目的

腕や手の障害のための支援機器は、手の役割や機能を分析することによって設計される<sup>13)</sup>。したがって本研究では、義手の設計も日常生活の記録から考察されるべきと考え、はじめに、義手の機能設計において把持機能が主な対象とされることの是非を考察した。健常者の一日で出現する手の作業を分析することで、使用する頻度の高い動作を明確にし、義手に付与する機能の優先順位を明確にした。

### 1.2 方法

#### 1.2.1 対象者

対象者は20代男性の健常者3名とした。いずれも研究活動を行う工学系の学生であり、全員右利きであった。なお、本研究は東京電機大学ヒト生命倫理委員会の承認（受付番号30-65, 31-096, 02-08）を得て行った。

#### 1.2.2 記録方法

記録に使用したカメラは、画角の広いビデオカメラ PIXPRO SP360 (Kodak 社) で対象者の胸部に装着することで、カメラと記録対象物の間に物が映ることを防ぎつつ、撮影者を設けないために自然な日常生活の様子が撮影できた。このビデオカメラは、シャツの上から胸骨の位置で専用ハーネスによって装着することが可能である (図 6)。1440×1440 (30 fps) モードでの長時間撮影であるため、バッテリー (Kodak 社, LB-080, 1250 mAh) 3個とビデオカメラの記録媒体である32 GB の microSDHC Card を3枚用意し、交換しながら継続撮影を行った。

記録期間は、義手使用者の生活を想定し、起床後に義手を装着してから就寝前に外すまでと同期間とした。本実験では、対象者が起床して自分でカメラを装着した後、録画開始ボタンの押した時点を撮影開始とし、撮影終了は就寝の直前に対象者自ら録画停止ボタンを押下した時点とした。記録対象は20代大学生の平日で、家で起床し、大学での活動後、家で就寝するまでの一日の手の動きである。計測を行う際、自然な日常生活の様子を撮影することを原則とするため、外部からの撮影は行わなかった。なお、着替え、トイレ、入浴といったプライバシーに関わると判断した場合は、対象者が録画を一旦停止させることとした。



図 6 左：高画角ビデオカメラ\*，右：装着図

\*<https://www.maspro.co.jp/products/pixpro/about-sp360/>

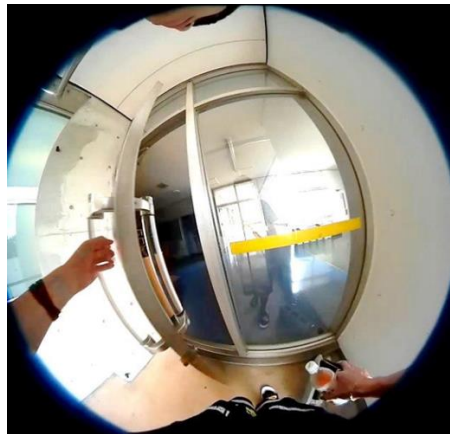


図 7 記録された映像

### 1.2.3 分析方法

ビデオカメラの録画映像から、対象物を手で動かすことを手の作業と定義して、対象物と使用した手（左右または両手）、その動作を分類した。分類は筆者の記録動画の観察にもとづいて行い、動作ごとの出現回数と各動作の時間を記録した。なお、手関節以近による対象の操作、意味のない動作や癖と判断した動作は、日常動作に必要な動作として、本実験の目的である設計指針には寄与しないため記録対象から除外した。対象物は、手に触れているものの分類を記録した。分類名は普通名称（水、紙、缶など）とし、寸法、形状、重量については記録しなかった。また、車の運転、キーボードとマウスの使用、箸の開閉、携帯電話の使用、喫煙を特殊な作業として、本実験の分類に含まなかった。これらの作業は市販されている義手手先具では容易ではなく、それぞれの作業に特化した自助具等の道具を用いるのが効率的であると判断したため、汎用的な義手の設計課題の調査対象から除外することとした。例としてキーボードの使用は stick に分類され、キーボードを使用する時間が長かった場合、stick の開発優先順位が高いという結果となる。しかし、ボタンを押す機能に特化してもキーボードを十分に使用できるわけではないとした。また、喫煙については習慣の有無に個人差のある趣味・嗜好の中でも出現回数と出現時間が多くなる作業である。これらの作業が各肢位の出現頻度の分析に影響を及ぼすことで日常生活動

作よりも特殊作業への偏りが顕著になる可能性がある。日常生活動作の出現割合の特徴が希薄になった結果、日常生活動作に対して実用性のない義手になると判断し、特殊作業を除外した作業のみを分析対象とした。

手の動作は *grasp*, *hook*, *plate*, *stick*, *drag* の 5 つに分類した。 *grasp* は手のいずれかの部位で挟むことにより対象物を変位させる動作とし、本研究では握力把握や精密把握<sup>14)</sup>の区別はしなかった。 *hook* は母指の参加がなく、第 2 指から第 4 指の MP, PIP, DIP 関節のいずれかを屈曲することによって対象物を操作する動作であり、袋を吊り下げる際や机の引出し作業で出現する。 *plate* は手を面として扱い、対象物に触れる際に出現するもので、MP 関節以遠は対象物との接触に関与しないか、手掌と同一平面上で関与するものとした。 *stick* はいずれかの指を他より突出させることで面積の小さい対象物の操作を行う際に出現する形とした。 *drag* は前述の形状をとる必要もなく、対象物を持ち上げずに移動させる際に出現し、皮膚の摩擦の利用や腕の延長部位として使用するなど、手特有の機能を要せず対象物を操作するものとした。

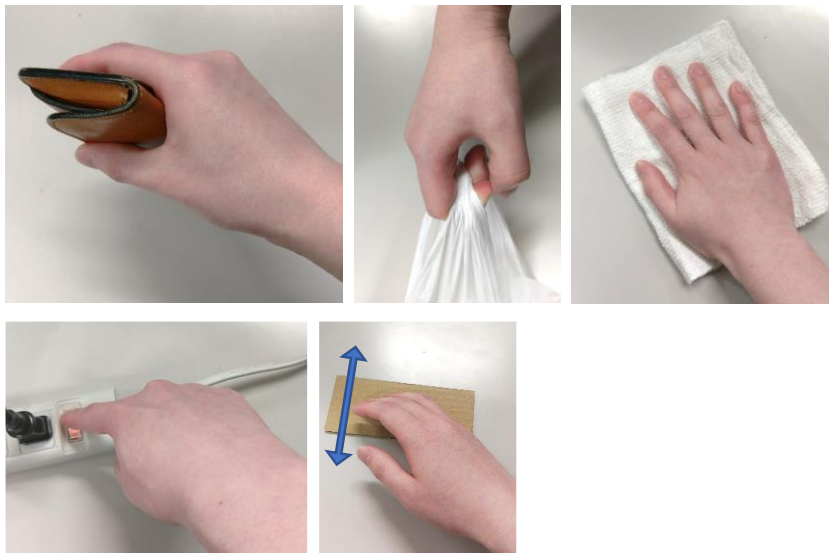


図 8 手の動作の分類

上左： *grasp*，上中央： *hook*，上右： *plate*，下左： *stick*，下中央： *drag*

### 1.3 結果

対象者 3 名の日常生活における作業場所の大まかな時間遷移を図 9 に示す。なお、図の各項目の幅は作業場所の時間割合に準拠したものである。手の動作の合計時間は 42498 s であり、各動作の出現時間割合は *grasp* が 88%，*hook* が 9%，*plate* が 2%，*stick* が 0%，*drag* が 1%であった（図 10 左）。3 名の 1 日に出現した手の動作回数は総計 2320 回であり、動作に参加した手の割合は、右手が 48%，左手が 29%，両手が 23%であった（図 11）。また、各動作の出現回数割合は *grasp* が 68%，*hook* が 12%，*plate* が 8%，*stick* が 4%，*drag* が 8%であった（図 10 右）。

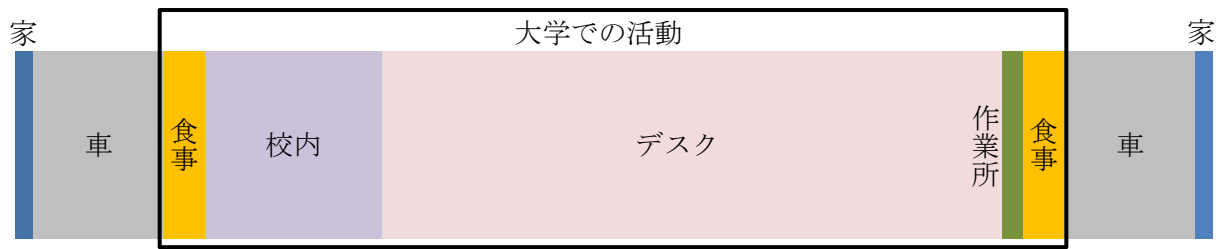


図 9 1日の作業場所の遷移例（各項目の幅は作業場所の時間割合準拠）

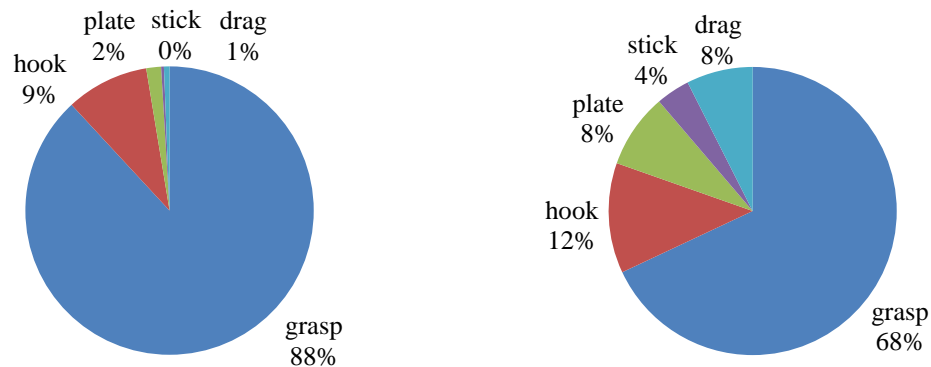


図 10 左：各動作の出現時間割合，右：各動作の出現回数割合

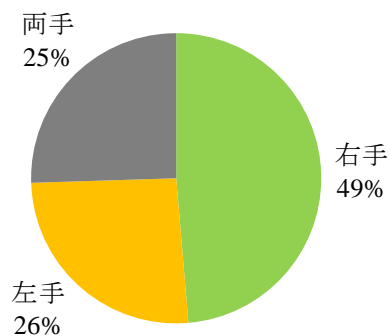


図 11 作業に参加した手の左右の回数割合

## 1.4 考察

### 1.4.1 作業を行う手の左右について

作業を行う手に関して、約半数の作業を右手のみで行っていたが、健常者が両手を使用する作業回数が、特殊作業を除いても 20%以上であることを考慮すると、反側の手と組み合わせた作業を前提とした機能開発の必要性は高い。なお、個人因子と環境因子が作業に参加する手の左右に影響を与えていることを留意すべきである。本実験の対象者が全員右利きであったことは作業に参加する手の決定に関わる個人因子である。また、対象物の種類や身体との相対位置によって、

作業に参加する手の選択肢が狭まる場合があり、作業する上での環境因子として、対象者の行動を制限していることとなる。例として、自動販売機のコイン投入などの作業は、使用者の利き手に関わらず、右手を使用することを想定して設計しており、左右の手の作業に偏りが生じる。したがって、右手を欠損した場合、残された左手で75%の片手作業の全てを切断前と同様に行うことができるとは限らないといえる。片手しか使えない場合に作業に不都合が生じる場面は、両手作業25%よりも多くなると考えられる。使用手が限定される場面がある以上、義手機能の向上は必要である。

#### 1.4.2 手部の動作の優先度について

汎用な日常生活動作を対象とした義手の動作機能の開発優先順位は、手部の動作の出現回数に基づくべきである。したがって、grasp, hook, plate, drag, stickの順が、動作の付与優先順位であると考えられる。また、義手の形状や再現すべき肢位を考察する際は、動作の出現時間に基づくべきである。したがって、成人男性ではgrasp, hook, plate, drag, stickの順が、形状もしくは肢位変更で再現すべき機能の付与優先順位であると考えられる。なお、この順は出現時間の多い順と同じである。以上より、把持機能が出現時間と出現回数両方の観点から機能付与の優先順位が高いと考えられる。また、動作1回あたりの把持時間(図12)が長いことから、ワイヤ牽引方式の任意開き式や、筋電義手のように開く動作と閉じる動作の操作信号をそれぞれ別に設定する方式を採用し、一度握ると開く命令まで開かないようにするべきであると考えられる。2番目に出現頻度が多いhookは、動作機能または形状で再現すべきである。dragは手先具表面の摩擦を用いた手先の運用方法であり、特定の形状や運動を必要とする動作ではない。stickは、動作1回あたりの時間が非常に短いことから、動作命令による押下ではなく、手先具の形状や肢位変更機能によって再現する手段をとるべきである。日常生活で使用できる手先具を設計、選択する際には以上を満たした上で、はじめて特定の特殊作業を追加させるなどの要素を追加すべきであると考えられる。

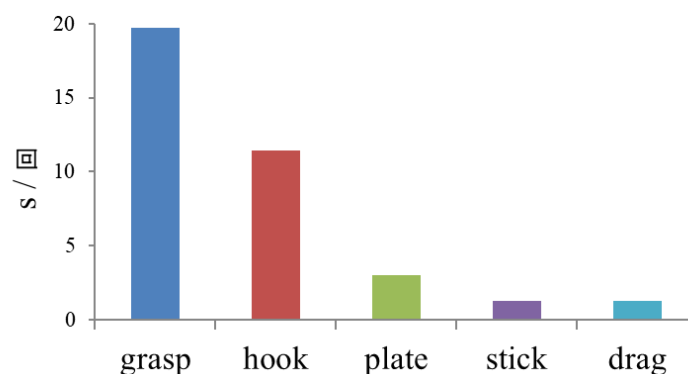


図 12 動作1回あたりの時間

### 1.4.3 義手設計において対象にする把持について

前小節の分析により日常生活の記録にもとづいた把持の重要性が示された。そこで、実用的な把持機能を備えた義手を設計するにあたり、どのような条件における把持機能を想定するべきかを調査する必要がある。本研究では把持について、把持に至るまでの動作（以下、把持遂行時間）と対象物保持中の動作に大別してどちらの期間の動作を対象とすべきかを考察した。日常生活の記録から把持1回あたりの把持し続けた時間（以下、把持継続時間）を抽出し、各出現時間における出現回数の合計を算出した。

日常生活における把持継続時間について、縦軸を回数、横軸を1回あたりの把持継続時間として示す(図 13)。30 s 以上の把持は「30+」としてまとめて表示する。3名の1日の把持継続時間は、3 s 以内の極短時間の把持が323回。また、30 s 以上の長時間の把持が171回であった。3 s 以内に把持をやめる把持の回数が多く、30 s 以上の長時間にわたり把持継続した回数の約2倍であった。把持中の対象物を変位および回転させることが多いと考えられる長時間の把持が、極短時間の把持よりも多い場合は把持継続中の動作が重要な要素であると考えられた。しかし、極短時間の把持が多かったため、把持遂行時間を短縮できる義手設計を優先するべきであるとし、本研究では把持遂行までの動作の分析を行うこととした。

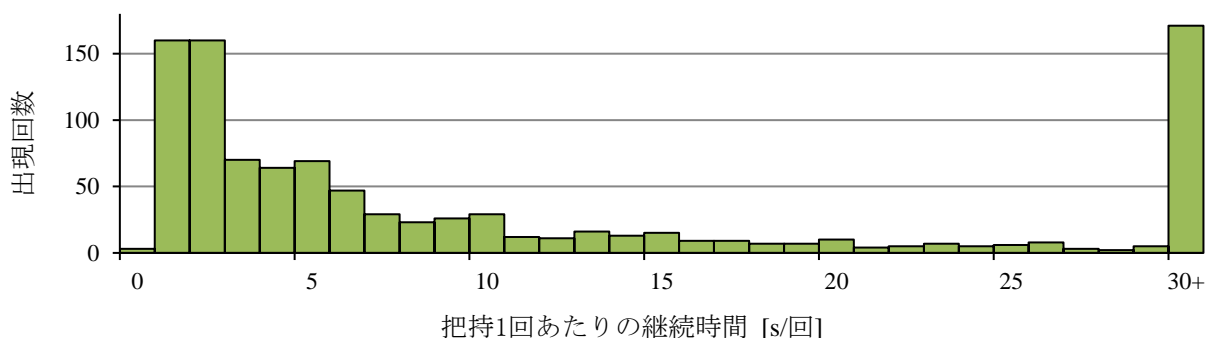


図 13 把持1回あたりの継続時間の分布

## 2. 既製の義手による把持遂行時間

### 2.1 実験目的

前節で義手の関節構成の構築のために把持遂行までの動作を分析することとした。そこで、健常手と手先具を用いた模擬筋電義手による把持遂行時間の比較によって、各動作間の差異の要因を考察することを目的とした。



## 2.2 方法

日常生活における把持継続時間について、第2章1節で得た日常生活における手の作業記録にて出現した各把持の継続時間から、把持1回あたりの把持継続時間の分布を抽出した。また、同調査において把持対象となるが多かった缶、ペン、ノートの3種類を対象として、それぞれを実験環境下に健常手と模擬筋電義手にて把持遂行時間を計測、比較した。把持遂行時間は、手部初期位置の簡易フォースプレート（HND）と対象物初期位置の簡易フォースプレート（OBJ）の鉛直方向の力が変化したときの時間から求めた。対象者が手部初期位置である簡易フォースプレート（HND）から手を動かして鉛直方向の力が変化した時点把持作業開始とし、対象物を完全に持ち上げ、対象物初期位置の簡易フォースプレート（OBJ）の鉛直方向の力が対象物を載せていないときの値になった時点把持遂行完了として、把持作業開始から把持遂行完了までの時間を把持遂行時間とした（図14）。実験は健常者1名を対象として、練習期間を設けずに各対象物の把持を3回ずつ記録した。なお、実験機器のトラブルなどによって、正確な鉛直方向の力が計測不可能であった試行についても、各変化の始点・終点が確認可能であれば実験データとして取り扱うこととした。

その後、対象物3種のなかで最も把持遂行時間の長かった対象物について、30回まで試行を行い、5回ごとに把持遂行時間を測り、対数近似を用いた習熟予想による学習曲線で把持遂行時間を予想した。対数近似を式(1)に示す。aは既知のyと既知のxのデータから得た傾き、bは既知のyと既知のxのデータから得た切片を示す。

$$y = a \log_e(x) + b \quad \dots\dots(1)$$

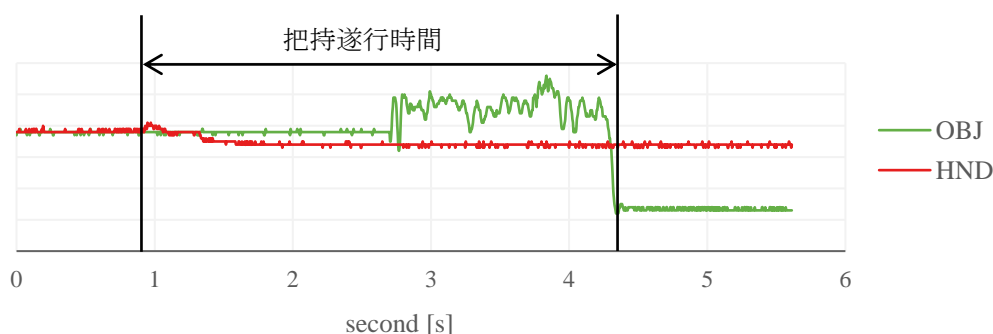


図14 2つのセンサが検出する鉛直方向の力の時間変移例と把持遂行時間

### 2.2.1 使用機器

模擬筋電義手（図15）の手先具にはハンド型のDMCハンド（ottobock社、8E38）を用いた。簡易フォースプレートは、3軸力センサ（Touchence社、T40S1-WM155-K1-P1A-C100、250Hz）（図16）をアクリル板の下に配置したものであり、アクリル板上に配置されたもののから鉛直方向の力のみを受ける。手部初期位置の簡易フォースプレートは100mm四方のアクリル板で、



机天板の手前端から 100 mm 奥に配置した。対象物初期位置の簡易フォースプレートは 1 端を蝶番で固定した 2 枚の亚克力板（図 17）で 3 軸力センサを挟んだもので、対象物初期位置はセンサより 50 mm 奥とした。機器の配置を図 18 に示す。

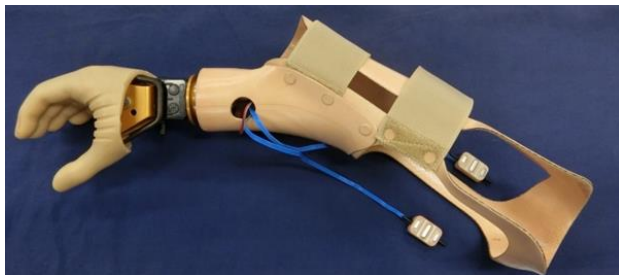


図 15 模擬筋電義手

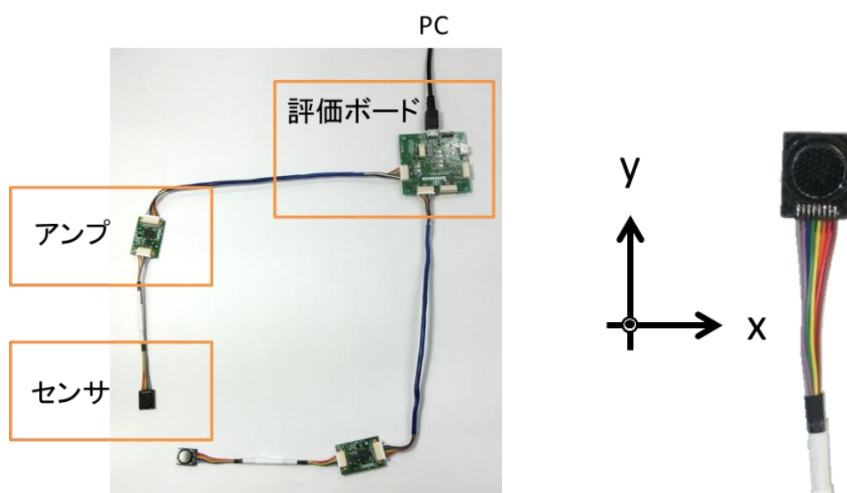


図 16 左：3 軸力センサ（T40S1-WM155-K1-P1A-C100），右：センサ配線図

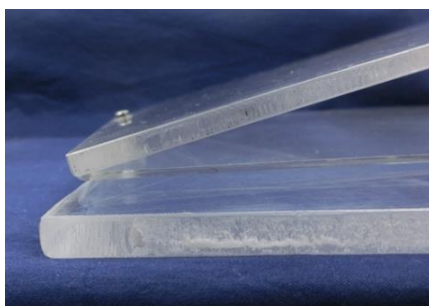


図 17 簡易フォースプレート（亚克力板）

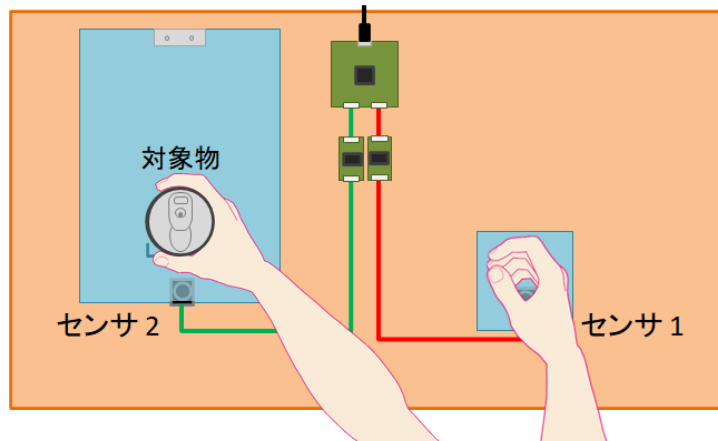


図 18 机上の実験機器配置図

### 2.2.2 実験手順

実験手順は、以下である。

- ① 対象物と手部を配置していない状態の力センサの鉛直方向の値を記録する。
- ② 手部と対象物を初期位置に配置し、センサが力を検出していることを確認する。
- ③ 実験対象者に記録開始の合図を出す。
- ④ 実験対象者は自分のタイミングで、初期位置から手部の移動を開始する
- ⑤ 実験対象者は対象物を把持し、机上から持ち上げる。
- ⑥ 実験対象者に記録終了の合図を出す。
- ⑦ ②から⑥を規定回数行う。

### 2.3 結果

健常手と模擬筋電義手での測定結果を、把持遂行時間を縦軸に、試行回数を横軸に示す(図 19)。3回の試行の中央値を比較すると、健常手は、缶 0.92 s、ペン 1.00 s、ノート 1.78 s で把持したのに対し、模擬筋電義手では、缶 3.14 s、ペン 3.44 s、ノート 4.13 s であった。いずれの対象物においても健常手は模擬筋電義手よりも短時間での把持遂行が可能であった。模擬筋電義手で最も把持遂行時間が長かったノートの把持について、対数近似による習熟予想では 3 s 程度まで短縮されるが、健常手に及ばない結果となった。

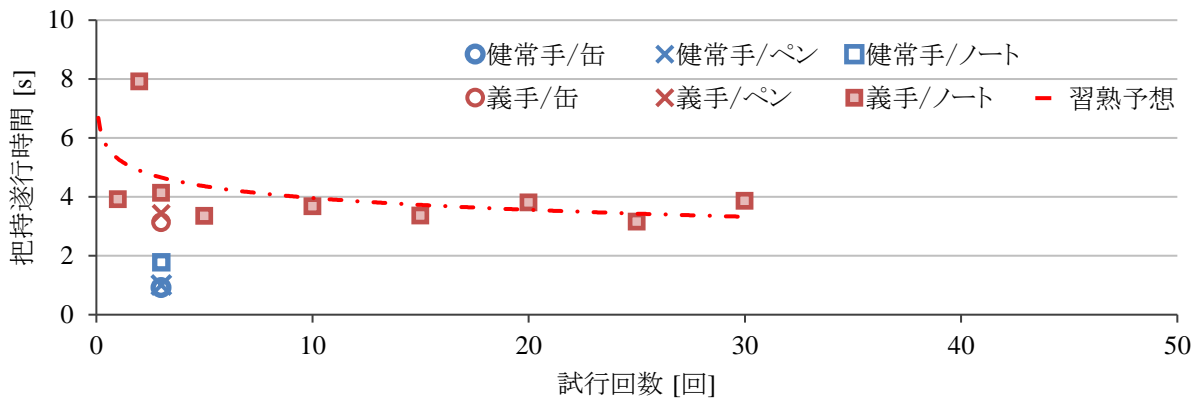


図 19 各条件の把持遂行時間と義手によるノート把持の習熟予想

## 2.4 考察

前節で日常生活においては極短時間の把持継続時間が多いことが確認された。しかし、模擬筋電義手での把持遂行には長時間を必要とする状況であり、この差が作業における義手使用が向上しない要因であると考えられる。義手の把持動作の許容応答時間は、健常手の把持遂行時間と同程度である 2 s 以下とすべきであり、視覚のフィードバックと慣れによって義手操作は習熟されるが、日常生活において頻出する極短時間の把持遂行は困難である。把持遂行時間が増加する要因としては、機械的な応答時間、触覚のフィードバックがないために必要となる目視確認の時間、手先具の把持形態と関節構成の不一致、手関節機能がないことによる代償動作の時間（図 20）が挙げられる。このうち、手先具の把持形態と関節構成の不一致と手関節機能については義手の設計によって改善可能であり、手関節機能の設計要件は、日常生活に必要な把持形態の調査によって決定することが可能であると考えられる。

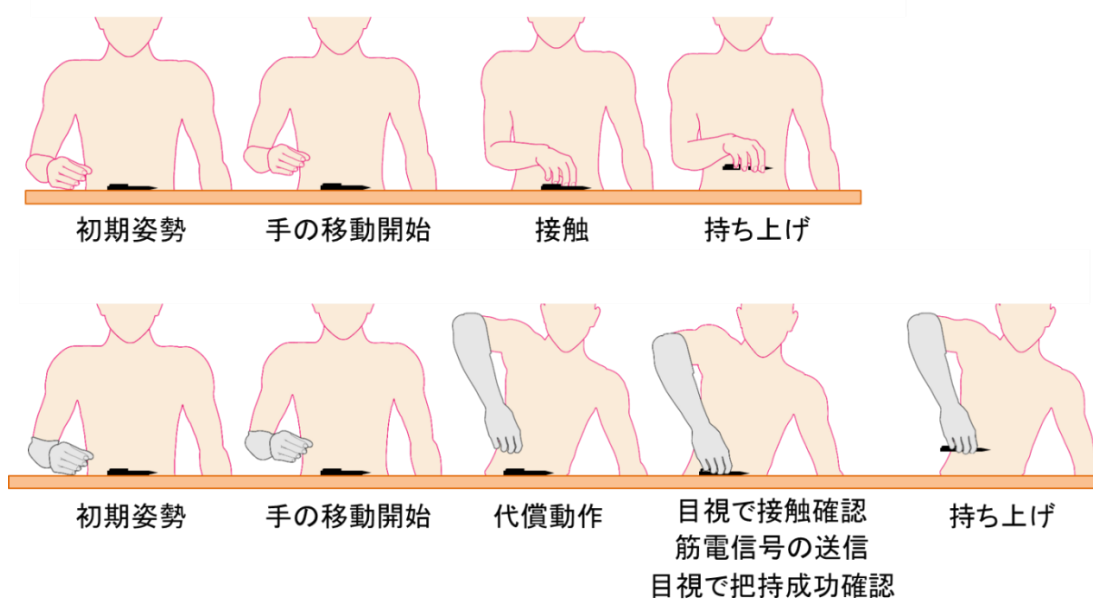


図 20 健常者と前腕義手使用者の把持動作の比較

### 第3章 把持方向による分類と考察

## 1. 把持アプローチの計画

多関節ロボットアームにおける把持アプローチの計画は、手先の位置と姿勢をもとに逆運動学を用いて、手先が目標地点に目標姿勢で存在する場合に取りうる各関節の角度を算出することで行われる<sup>32)</sup>。ヒトも把持対象物の視覚情報から特徴情報を抽出し、事前に把持点や手形状を計算している<sup>33)</sup>ことから、与えられた手先の位置と姿勢の情報をもとにして、上肢の関節の数と自由度、関節可動域を拘束条件として、逆運動学的に各関節がとるべき角度が算出されることと同様であると考えられる。健常者はこのような把持アプローチの計画に沿って対象物を把持する（図 21）が、義手使用者の場合は拘束条件である関節の数と自由度が義手機能に依存する。前腕義手使用者の手先の位置と姿勢を制御する上肢の要素は、肩関節と肘関節、手継手であり、手継手の関節構成が拘束条件を決定する。なお、逆運動学問題では関節角度に複数の解が算出される。ロボットにおいては関節角度を決定するために評価関数としてエネルギー最小化を用いるが、義手使用者においては関節構成（図 22）を決定するための評価関数として、代償動作の少なさをを用いて肘の位置などを指標に評価することが妥当であると考えられる。しかし、従来の方法である把持形態の再現を目標とする義手設計では、使用者の残存関節の代償動作の抑制について適切な評価ができず、把持アプローチの計画が不可能であるため、手継手の関節構成を構築できない。したがって、手先具機能と手継手機能について同時かつ同じ重みで考察可能な分類方法が必要であるとして、把持方向による分類を新たに設定した。

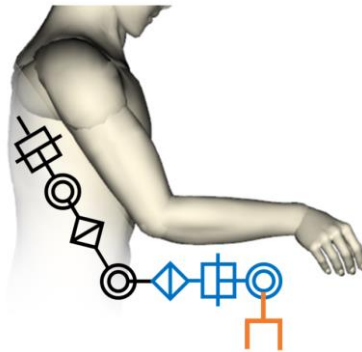


図 21 健常者の把持アプローチ

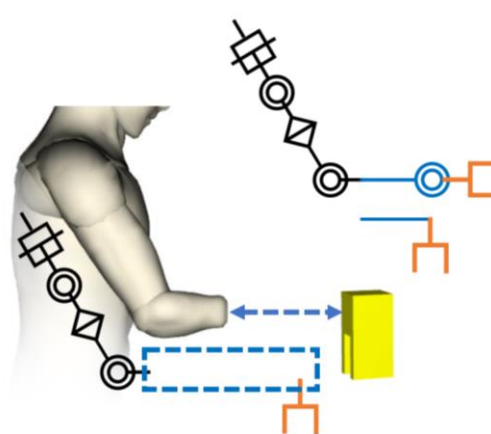


図 22 前腕切断者の把持アプローチにおける義手関節部分と関節構成の例

## 2. 把持方向による分類

### 2.1 把持方向の概要

手先具機能と手継手機能について同時かつ同じ重みで考察することは、把持形態による分類では不可能であった。そこで、新たな分類方法として把持方向による分類を提案した。把持方向は、身体を基準に手部が把持できる方向を表した相対座標系である。本研究では、手部の有する把持方向（以下、生体の場合は手部把持方向、義手の場合は手先具把持方向）について、体幹を基準とした体幹座標系把持方向と、前腕を基準とした前腕座標系把持方向の2つを用いて表現した。各把持方向についてはこの節で説明する。日常生活における把持方向の傾向を用いた指標は、義手の手先具機能と手継手機能について同時かつ同じ重みに評価可能な指標であり、義手ハンドと手継手の組み合わせの定量的評価を可能にするものであるため、義手ハンドの設計要件の抽出に適している。

### 2.2 手部把持方向

手部把持方向は、手部が把持できる方向である。把持に参加した主要な指・部位の方向を基準に手部把持方向が設定される。手部把持方向は、把持に参加した主要な指の方向から定義される。ペンの把持（図 23 左上）を例とすると、はじめに Iberall が提案する *virtual fingers*<sup>34)</sup>を参考に、把持に参加した主要な指の MP 関節から指先を結ぶ仮想指を定義する（図 23 右上）。対象物を挟み対立する2本の仮想指（以下、主要2指）の長軸方向を合成した方向に対して垂直な面（図 23 左下の薄緑平面）を、把持方向を構成する平面（以下、把持方向平面）とし、主要2指が対象物を把持する瞬間の接触点の運動方向に垂直かつ把持方向平面上の軸（図 23 右下の黒破線）を、把持方向を構成する軸（以下、把持方向軸）とする。以上より、主要2指が対象物を把持する動作を把持方向平面上の把持方向軸を挟む動作に置き換えることができ、把持方向平面と把持方向軸の組み合わせを手部把持方向とする。この軸および平面について、本節にて後述する前腕座標系もしくは体幹座標系にて設定した軸および平面を基準に、近似する軸および平面に当てはめて 90 deg 刻みで記述し、それぞれ前腕座標系把持方向と体幹座標系把持方向とする。

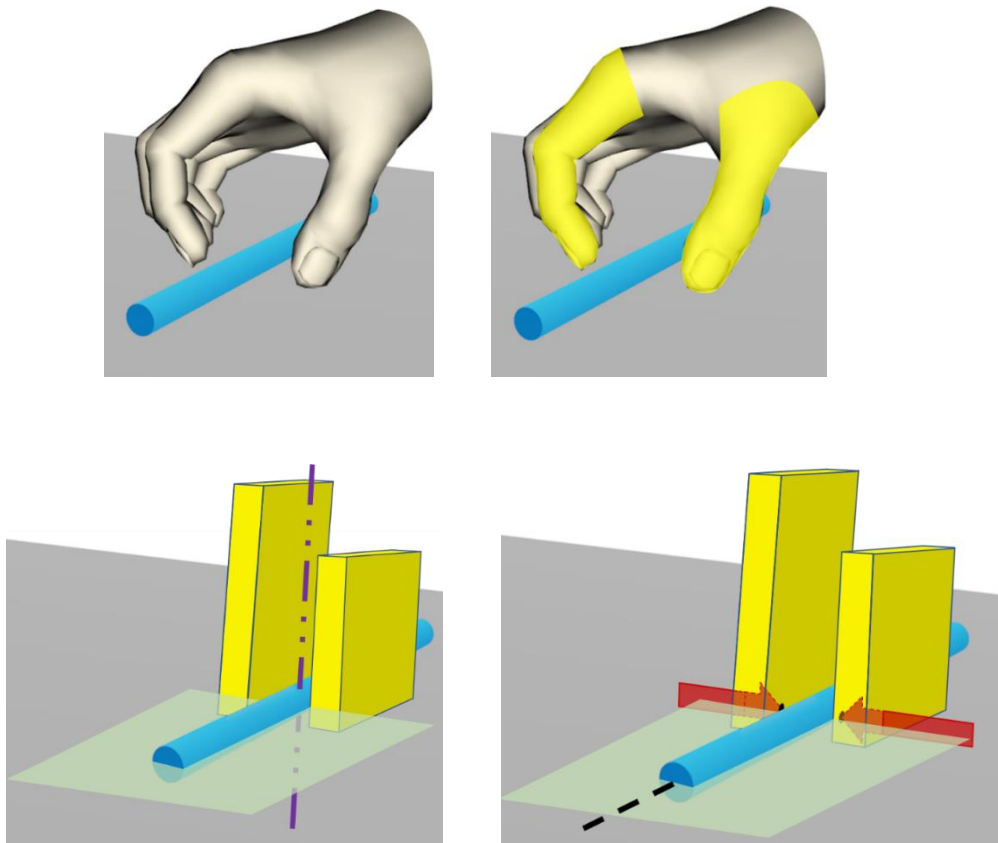


図 23 手部把持方向の定義

左上：ペン（水色円柱）の把持

右上：把持に参加した主要な指を仮想指（黄色）とする。

左下：主要2指（黄色ブロック）の長軸方向を合成した方向（紫2点鎖線）に対して垂直な面を把持方向平面とする（薄緑平面）。

右下：主要2指が対象物を把持する瞬間の接触点の運動方向（赤矢印）に垂直かつ把持方向平面上の軸を把持方向軸とする（黒破線）。



### 2.3 前腕座標系

前腕座標系は前腕を基準とした座標系であり，前腕座標系把持方向は前腕の姿勢に影響を受けない．義手における前腕座標系把持方向は，前腕基準の手先具把持方向であり，手継手肢位と手先具把持方向によって決定される．前腕座標系を記述する際は，接尾に「A」を下付きで付与する．

前腕座標系の定義および記述方法は，次のとおりである．前腕の縦軸を  $y_A$  軸とし，この軸に直交し，肘関節に平行な軸を  $x_A$  軸とする（図 24）．これら 2 軸からなる「 $XY_A$ 」平面に垂直な軸を  $z_A$  軸とする． $XY_A$  平面上  $x_A$  軸の把持方向を「 $XY(x)_A$ 」とする（図 25）．前腕座標系は後述する体幹座標系の座標軸設定方法に則った左手系の座標系である．

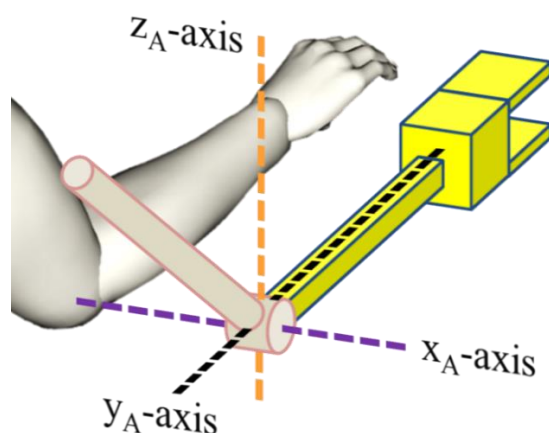


図 24 前腕座標系

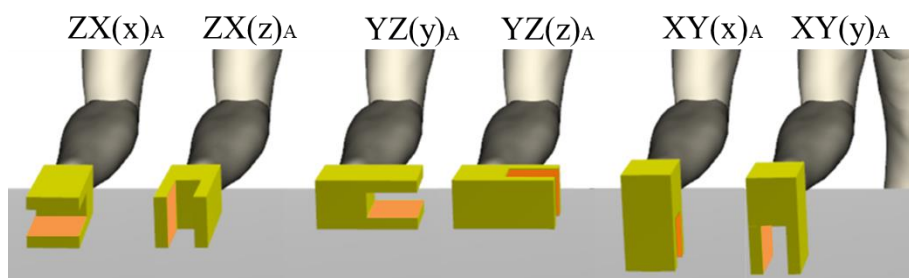


図 25 前腕座標系把持方向

### 2.4 体幹座標系

体幹座標系は，体幹を基準とした座標系であり，肩関節と肘関節，前腕座標系把持方向の影響を受ける．ヒトの把持アプローチにおける手先の位置と姿勢は，体幹座標系把持方向を用いて表現できる．義手機能考察においては，義手に付与すべき機能である肩・肘関節で補完できない機能について抽出するのに必要である．体幹座標系把持方向には把持位置として体幹と把持対象物との相対位置関係を追記し，正中線と交差せずに把持する同側把持と中央線を挟む反対側把持に

分類する (図 26). 体幹座標系把持方向の接頭には, 同側把持 (ipsilateral grasp) の場合は「i-」を付与し, 反対側把持 (contralateral grasp) の場合は「c-」を付与する.

体幹座標系の記述する際は, 接尾に「T」を下付きで付与する. 本研究においては, 被写体の胸部にビデオカメラがあるため, 録画した動画の画面を用いて定義できる. 画面の左右軸を「 $x_T$ 軸」とし, これに直交する鉛直方向の軸 (画面の縦軸) を「 $z_T$ 軸」とする. なお,  $z_T$ 軸の中でも, 画面の中心線を正中線とする. 画面に直交する方向を  $y_T$ 軸として, 3次元直交座標系の軸が全て定義される. また, これらの軸からなる平面については, 例として,  $x_T$ 軸と  $y_T$ 軸からなる平面は「 $XY_T$ 」と記述する (図 27). この  $XY_T$ 平面は, 身体の水平面であり, 机上作業中では机の天板に対して水平である.

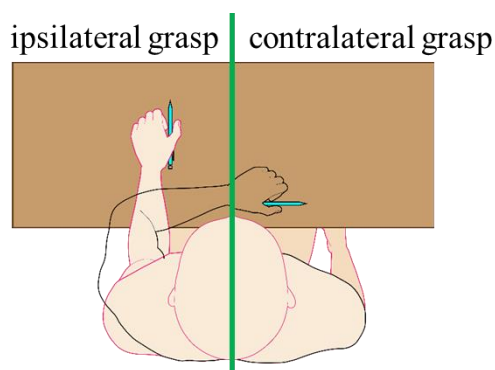


図 26 体幹座標系把持方向に付する把持位置情報の基準

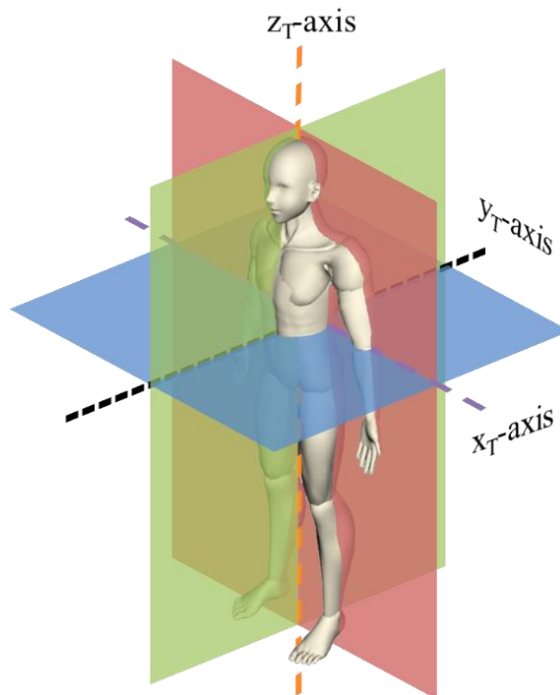


図 27 体幹座標系

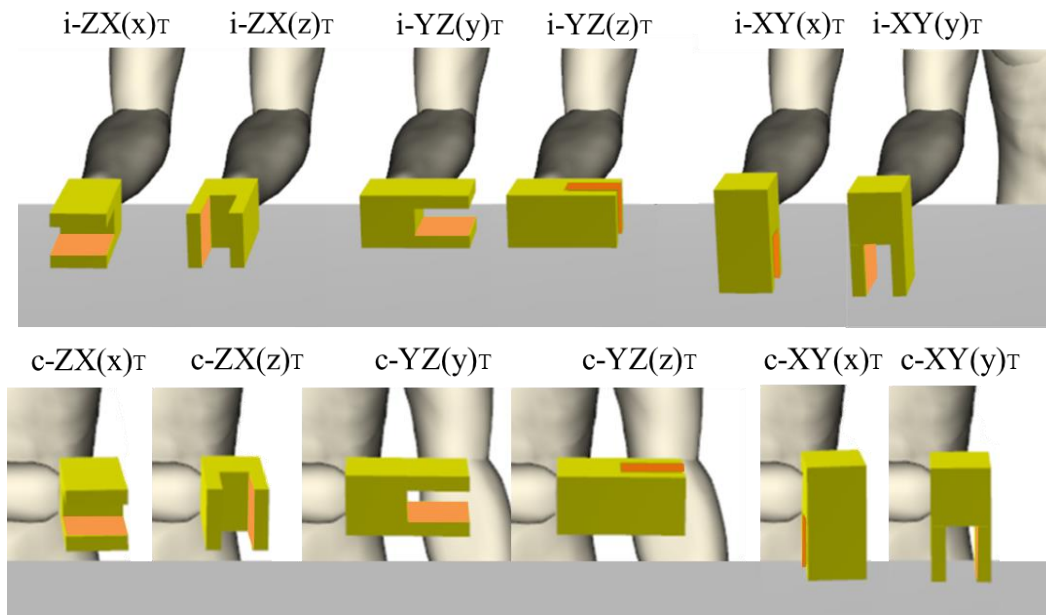


図 28 体幹座標系把持方向  
上：同側把持，下：反対側把持

### 3. 体幹座標系把持方向と前腕座標系把持方向寄与率の関係

義手は指の動きが限られているため、前腕義手使用者は上肢の肩関節および肘関節による手先の方向制御が必要となるが、体幹の姿勢変更が制限される座位では、上肢の代償動作は顕著に増幅する。さらに、前腕・手関節機能を持たない前腕義手の場合、この上肢運動の増幅は顕著になる。指の動きが制限されているため、上肢の肩関節および肘関節による方向制御が必要となる<sup>28)</sup>。この方向制御を軽減するために、日常生活でどのような把持が必要であるかを調査する必要があると考え、本研究は座位によって体幹の姿勢が制限される机上作業中の把持の調査に着目した。

義手使用者の前腕座標系把持方向は義手機能に依存し、体幹座標系把持方向は前腕姿勢と前腕座標系把持方向に依存する。天板の影響で机上把持に使用できる前腕姿勢は限られているため、体幹の側屈や回旋、肩関節 90 deg 以上の外転などの過大な代償動作をしない条件下で想定される前腕姿勢を抽出することで、各前腕座標系把持方向が実現できる体幹座標系把持方向の想定が可能となる。

義手における前腕座標系把持方向は、義手部品の性能である手継手の回転軸種類及び数と手先具の把持方向種類及び数に依存する。このような義手部品の性能の組み合わせによって決定される前腕座標系把持方向が日常生活における把持にどれだけ寄与できるかを評価することで、義手機能の選択の指標にすることが可能となる。各前腕座標系把持方向が把持にどれだけ寄与できるかを示す指標を前腕座標系把持方向寄与率とする。各前腕座標系把持方向寄与率は、それぞれが実現できる体幹座標系把持方向の出現割合を足し合わせることで算出できる。逆説的に、把持への対応率と解釈することもできる。この指標は義手使用者の技量によらずに、義手そのも

のの評価ができる指標である。本研究では、日常生活での机上把持における把持方向出現割合を参照するため、算出される指標は机上把持への寄与率となる。

### 3.1 肩・肘関節の作用

腕の姿勢は前腕座標系の基準であり、肩・肘関節による肢位変更によって前腕座標系把持方向が回転、変位し、体幹座標系把持方向が変更される。前腕座標系把持方向が同じでも、前腕の姿勢によっては異なる体幹座標系把持方向となる。つまり逆説的に、各前腕座標系把持方向は、肩および肘関節による肢位変更で異なる体幹座標系把持方向を実現できるといえる。実現できる体幹座標系把持方向は各前腕座標系把持方向で複数存在する。机上作業では天板の影響で対象物への把持アプローチに制限があり、座位時には更に体幹の位置と方向、前腕の位置と関節可動域が制限される。この制限の中で前腕座標系把持方向を回転および移動させ、机上把持をシミュレートすることで、各前腕座標系把持方向が実現可能な体幹座標系把持方向が明らかとなる。机の天板の高さは天板に手を置いたときに上腕が垂直かつ肘関節 90 deg となる高さとして、義手装着者が座位中の机上把持において使用することのできる肢位は図 29 に示す 4 種である。例として前腕座標系把持方向  $XY(x)_A$  (図 29①) が、肘・肩関節による肢位変更で可能になる体幹座標系把持方向は  $i-XY(x)_T$  (図 29②),  $c-XY(y)_T$  (図 29③),  $c-ZX(z)_T$  (図 29④) である。このように体幹姿勢制限と各関節可動域を考慮して机上把持をシミュレートした結果、各前腕座標系把持方向が実現できる体幹座標系把持方向が導出できる。図 5 の各肢位で実現できる体幹座標系把持方向を図 29 の番号順に上から並べた表を MAP と称し、表 1 に示す。なお、肘・肩関節による肢位変更で把持方向が  $XY_T$  平面上向き、 $YZ_T$  平面外向き、 $ZX_T$  平面体側向きになる場合は机上空間の対象物の把持ではないため、無効な机上把持方向として空欄とした。

各前腕座標系把持方向が実現可能な体幹座標系把持方向について、動画の分析で求めた各出現回数割合を合計すると、各前腕座標系把持方向が実現できる机上作業の割合が算出される。この割合は各前腕座標系把持方向が机上把持にどれだけ寄与できるかを評価する指標であり、本研究では机上把持方向寄与率と称し、この値をもとに議論する。

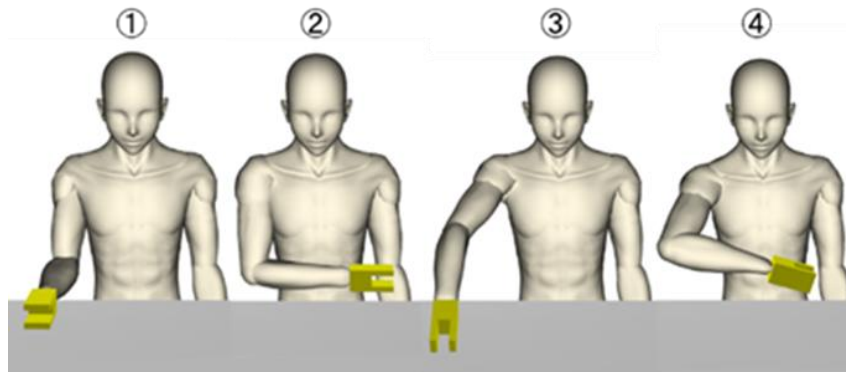


図 29 肩・肘関節による肢位変更による複数の体幹座標系把持方向の実現

表 1 各前腕座標系把持方向が実現できる体幹座標系把持方向 (MAP)

	$x_A$	$y_A$	$z_A$	
$XY_A$	$i-XY(x)_T$	$i-XY(y)_T$	/	①
	$c-XY(y)_T$	$c-XY(x)_T$		②
				③
	$c-ZX(z)_T$	$c-ZX(z)_T$		④
$YZ_A$	/	$i-YZ(y)_T$	$i-YZ(z)_T$	
		$i-XY(y)_T$	$i-XY(x)_T$	
		$c-XY(x)_T$	$c-XY(y)_T$	
$ZX_A$	$i-ZX(x)_T$	/	$i-ZX(x)_T$	
	$c-YZ(y)_T$		$c-YZ(z)_T$	
	$i-ZX(z)_T$		$i-ZX(x)_T$	
	$c-YZ(z)_T$		$c-YZ(y)_T$	

## 3.2 義手の作用

### 3.2.1 手継手軸の作用

前腕および手関節機能の回転軸は回内外軸，掌背屈軸，撓尺屈軸の3種であり，手部把持方向を回転させることで，前腕姿勢を変更せずに複数の前腕座標系把持方向が実現可能となる．例として手継手  $y_A$  軸回転機能を有する  $XY(x)_A$  は，手継手による肢位変更で  $YZ(z)_A$  に変更される．これを「 $XY(x)_A=YZ(z)_A$ 」と表記する．

回内外，掌背屈，撓尺屈それぞれの回転機能が手先把持方向に与える影響は異なり，手継手で2軸を選択した場合には，元の肢位，近位軸のみ回転後の肢位，遠位軸のみ回転後の肢位，2軸とも回転後の肢位の4種の肢位があり，どの軸を近位に設定するかによって2軸とも回転した際の手先具の姿勢が異なる．手継手  $xy$  軸（近位に  $x$  軸回転，遠位に  $y$  軸回転）の回転軸によって

$XY(x)_A$  は  $ZX(x)_A$  に変更され、「 $XY(x)_A=ZX(x)_A=YZ(z)_A=YZ(y)_A$ 」と表記する。市販されている手継手は2軸までであり、3軸のものはない。市販されている手継手軸を複数搭載して3種の軸すべてを付与することは、サイズや重さ、軸間距離が課題となるため選択されることはない。

### 3.2.2 手先具把持方向の作用

手先具把持方向は、手先具の形状や開閉軸によって決定される。手先具把持方向が同時に複数ある場合、前腕座標系把持方向も同一肢位で複数あるとし、「 $XY(x)_A+XY(y)_A$ 」のように表記する。手継手  $y_A$  軸回転により  $XY(x)_A+XY(y)_A$  は  $YZ(z)_A+XY(y)_A$  に変更されるが、これを「 $XY(x)_A+XY(y)_A=YZ(z)_A+XY(y)_A$ 」と表記する。また、例として  $ZX(x)_A+ZX(z)_A$  の場合に、肩・肘関節の作用や手継手機能によって実現可能な体幹座標系把持方向が重複するが、義手機能が関与しない機能による重複であるため、把持方向寄与率の計算で2重加算はしないこととする。したがって、 $ZX(x)_A+ZX(z)_A$  が実現できる体幹座標系は、 $i-ZX(x)_T$ ,  $c-YZ(y)_T$ ,  $i-ZX(z)_T$ ,  $c-YZ(z)_T$  の4つのみである。

手先具把持方向の例として、ottobock社のDMCハンドやsensor hand speedは、第1指と第2、3指の対立を開閉する軸1つにより、把持方向を1つ有する(図30)。フック型は1つの軸で把持方向1つとそれに垂直な把持方向1つ、合計2つの把持方向を有する(図31)。

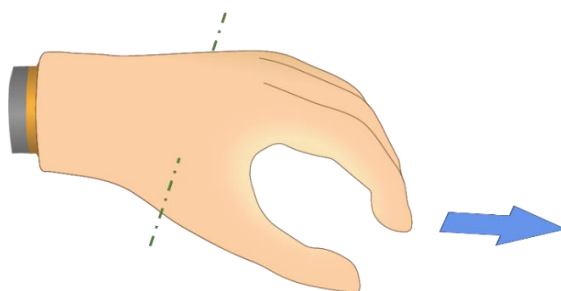


図 30 DMC ハンドは1軸で1つの把持方向を有する

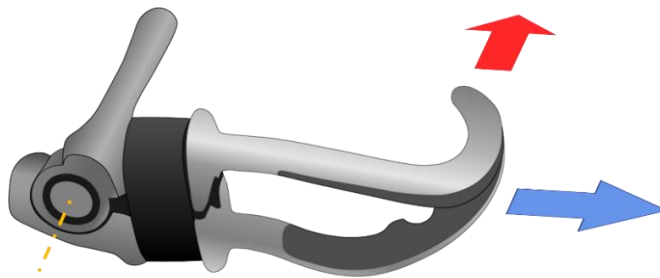


図 31 フック型手先具は1軸で2つの把持方向を有する

## 4. 日常生活における把持方向出現回数の抽出

### 4.1 目的

第2章の2つの実験より、義手に求められる機能は把持であり、許容把持遂行時間は2 s以内であるとした。義手使用における把持遂行時間増大の原因として、本研究は手先具の把持形態と把持アプローチの不一致と、手関節機能がないことによる代償動作に着目した。従来の把持の分類方法である把持形態による分類では、義手の設計において必要な手部機能と前腕および手関節機能の補完関係が評価できない。これを評価できる分類方法を確立し、義手設計における機能選択の基準とすることを目的とした。

### 4.2 方法

第2章1節で記録した動画内に出現する座位中の机上把持を抽出し、把持方向で分類した。対象物の把持について、使用手（左手、右手、両手）、把持位置（正中線を基準に左側、右側、中央）と体幹座標系把持方向で分類し、各出現回数を記録した。その後、使用手と把持位置の関係（同側把持、反対側把持）について、以下の条件で体幹座標系把持方向ごとに分類した。例として、

- ・左手で左側位置の対象物を把持した場合は、同側把持とする。
- ・左手で右側位置の対象物を把持した場合は、反対側把持とする。
- ・左手で中央位置の対象物を把持した場合は、反対側把持とする。
- ・両手で左側位置の対象物を把持した場合は、左手同側と右手反対側に1回ずつ加算する。
- ・両手で中央位置の対象物を把持した場合は、左手反対側と右手反対側に1回ずつ加算する。

なお、手関節以近による対象の操作、意味のない動作や癖と判断した動作は記録対象から除外した。

### 4.3 結果

対象者3名の日常生活の記録において、机上での把持は計1246回記録された。各把持方向出現回数は付録参照。この総計を100%とした各体幹座標系把持方向の出現回数割合を表2に示す。把持位置は同側把持(i-)が81.8%、反対側把持(c-)が18.1%であった。出現回数割合の高かった体幹座標系把持方向は、i-YZ(y)<sub>T</sub>で25.9%、次いで、i-XY(y)<sub>T</sub>が16.6%、i-ZX(z)<sub>T</sub>が15.4%であった。また、把持平面に着目すると、XY<sub>T</sub>面31.7%、YZ<sub>T</sub>面38.6%、ZX<sub>T</sub>面29.6%であり、把持軸はx<sub>T</sub>軸31.5%、y<sub>T</sub>軸50.7%、z<sub>T</sub>軸17.7%であった。

表2の体幹座標系把持方向の出現回数割合をMAP(表1)に従い合算した結果である前腕座標系把持方向寄与率を表3に示す。最も机上把持に寄与する前腕座標系把持方向はYZ(y)<sub>A</sub>で44.3% (i-YZ(y)<sub>T</sub> 25.9%, i-XY(y)<sub>T</sub> 16.6%, c-XY(x)<sub>T</sub> 1.8%)、次いでZX(x)<sub>A</sub>とZX(z)<sub>A</sub>が31.7%、最も低い寄与率はXY(x)の14.9%であった。



表 2 各体幹座標系把持方向の出現回数割合 (%)

	$x_T$	$y_T$	$z_T$
i-XY <sub>T</sub>	10.3	16.6	
i-YZ <sub>T</sub>		25.9	5.0
i-ZX <sub>T</sub>	15.4		8.6
c-XY <sub>T</sub>	1.8	3.0	
c-YZ <sub>T</sub>		5.2	2.5
c-ZX <sub>T</sub>	4.0		1.6

表 3 前腕座標系把持方向寄与率 (%)

	$x_A$	$y_A$	$z_A$
XY <sub>A</sub>	14.9	22.4	
YZ <sub>A</sub>		44.3	18.3
ZX <sub>A</sub>	31.7		31.7

#### 4.4 考察

日常生活における机上把持の 81.9%が使用手と同側であり，健常者は対象物に近い側の手を使用する傾向があることを示した．この結果は，健常手の再訓練によって切断手側の作業を代償するのではなく，体幹姿勢変更の減少のために義手側を活用すべきであることを示唆している．

出現率の多かった i-YZ(y)<sub>T</sub>は，本や紙束，皿，トレイなどを持つ際に出現した把持方向であり，i-XY(y)<sub>T</sub>は，机上のペンや立ててある本を把持する際に出現した把持方向である．いずれも机上作業の代表的な例であり，実験対象者個人の影響は軽微であると考えられる．把持の 3 つの面 (XY<sub>T</sub>, YZ<sub>T</sub>, ZX<sub>T</sub>) の出現率の差は少ないが，i-YZ<sub>T</sub>面の把持が多いのは，内側に掌が向くヒトの手の形状と，両手作業への移行しやすさが原因と考えられる．

各前腕座標系が実現可能な把持方向をもとに算出した日常生活における机上作業への寄与率は，YZ(y)<sub>A</sub>の 44.3%が最大である．手部把持方向 1 種で対応できるのは半分に満たないため，実現可能な体幹座標把持方向が増えるように手部機能もしくは手関節機能の追加が求められる．

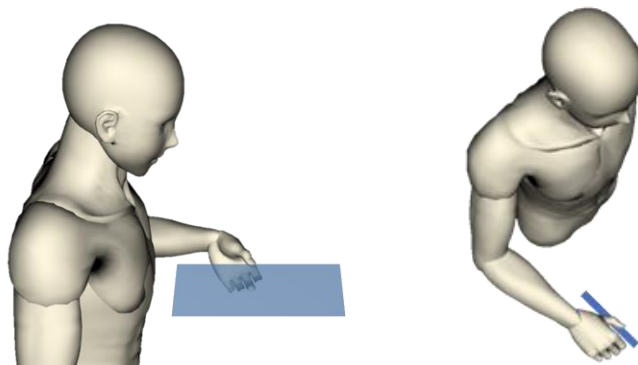


図 32 左：把持方向 i-YZ(y)<sub>T</sub>の例，右：把持方向 i-XY(y)<sub>T</sub>の例



## 5. 把持方向寄与率にもとづく義手機能選択

全ての把持方向を実現することができる最小単位の組み合わせは、手先具把持方向3つで手継手軸1種、手先具把持方向2つで手継手軸2種、手先具把持方向1つで手継手軸3種の3パターンにて存在する。本研究では、これ以下の組み合わせ、すなわち手先具把持方向1つで手継手軸1種、手先具把持方向2つで手継手軸1種、手先具把持方向1つで手継手軸2種の3パターンにおいて、各組み合わせの把持方向寄与率を導出し、日常生活に寄与できる義手機能を考察する。

### 5.1 義手の有する把持方向寄与率にもとづく義手機能選択

#### 5.1.1 概要

把持方向寄与率の計算時、手継手の作用による体幹座標系把持方向の重複を認めない。義手が有する把持方向の種類の評価であり、手先具把持方向数や手継手軸数によらず最大寄与率は100%である。義手に対応できる把持の割合を算出でき、より多くの対象物への把持アプローチが可能な義手を設計する際の指標となる。

#### 5.1.2 計算結果

手部把持方向と手継手回転軸の機能選択の各条件について、把持方向寄与率を表4-表6に示す。手部把持方向1種かつ手継手回転軸1種の場合(表4)、最も把持寄与率の高い組み合わせは、手継手z軸回転の $YZ(y)_A=ZX(x)_A$ (表4の4行目,4列目)で、日常生活での机上把持の76.0%に対して寄与できる。手部把持方向1種かつ手継手回転軸2種の場合(表5)、最高把持寄与率の組み合わせは、手継手xy軸回転の $XY(y)_A=YZ(y)_A=YZ(z)_A=ZX(z)_A$ (表5の3行目,2列目)と $YZ(y)_A=YZ(z)_A=XY(y)_A=ZX(z)_A$ (表5の4行目,2列目)、手継手xz軸回転の $YZ(z)_A=YZ(y)_A=XY(y)_A=ZX(z)_A$ (表5の5行目,7列目)と $ZX(z)_A=XY(y)_A=YZ(z)_A=YZ(y)_A$ (表5の6行目,7列目)の4パターンで、98.3%であった。手部把持方向2種かつ手継手回転軸1種の場合(表6)の最高把持寄与率の組み合わせは、手継手x軸回転の $XY(y)_A+YZ(y)_A=ZX(z)_A+YZ(z)_A$ (表6の7行目,2列目)、 $XY(y)_A+YZ(z)_A=ZX(z)_A+YZ(y)_A$ (表6の8行目,2列目)、 $YZ(y)_A+ZX(z)_A=ZX(z)_A+XY(y)_A$ (表6の13行目,2列目)、 $YZ(z)_A+ZX(z)_A=YZ(y)_A+XY(y)_A$ (表6の15行目,2列目)の4パターンで、98.3%であった。手部把持方向1種かつ手継手回転軸2種と、手部把持方向2種かつ手継手回転軸1種は、どちらも4種の前腕座標系把持方向を有するため、把持方向寄与率の値と組み合わせは共通である。

表 4 手部把持方向 1 種かつ手継手回転軸 1 種の机上把持方向寄与率 (%)

	x軸	y軸	z軸
$XY(x)_A$	$ZX(x)_A$	$YZ(z)_A$	$XY(y)_A$
	46.6	19.9	37.3
$XY(y)_A$	$ZX(z)_A$	$YZ(y)_A$	$XY(x)_A$
	54.1	48.3	37.3
$YZ(y)_A$	$YZ(z)_A$	$XY(y)_A$	$ZX(x)_A$
	62.6	48.3	76.0
$YZ(z)_A$	$YZ(y)_A$	$XY(x)_A$	$ZX(z)_A$
	62.6	19.9	50.0
$ZX(z)_A$	$XY(y)_A$	$ZX(x)_A$	$YZ(z)_A$
	54.1	31.7	50.0
$ZX(x)_A$	$XY(x)_A$	$ZX(z)_A$	$YZ(y)_A$
	46.6	31.7	76.0

表 5 手部把持方向 1 種かつ手継手回転軸 2 種の机上把持方向寄与率 (%)

	xy軸	yx軸	yz軸	zy軸	zx軸	xz軸
XY(x) <sub>A</sub>	ZX(x) <sub>A</sub>	YZ(z) <sub>A</sub>	YZ(z) <sub>A</sub>	XY(y) <sub>A</sub>	XY(y) <sub>A</sub>	ZX(x) <sub>A</sub>
	YZ(z) <sub>A</sub>	ZX(x) <sub>A</sub>	XY(y) <sub>A</sub>	YZ(z) <sub>A</sub>	ZX(x) <sub>A</sub>	XY(y) <sub>A</sub>
	YZ(y) <sub>A</sub>	ZX(z) <sub>A</sub>	YZ(y) <sub>A</sub>	ZX(z) <sub>A</sub>	YZ(y) <sub>A</sub>	ZX(z) <sub>A</sub>
	95.9	51.6	68.2	74.0	94.9	69.0
XY(y) <sub>A</sub>	ZX(z) <sub>A</sub>	YZ(y) <sub>A</sub>	YZ(y) <sub>A</sub>	XY(x) <sub>A</sub>	XY(x) <sub>A</sub>	ZX(z) <sub>A</sub>
	YZ(y) <sub>A</sub>	ZX(z) <sub>A</sub>	XY(x) <sub>A</sub>	YZ(y) <sub>A</sub>	ZX(z) <sub>A</sub>	XY(x) <sub>A</sub>
	YZ(z) <sub>A</sub>	ZX(x) <sub>A</sub>	YZ(z) <sub>A</sub>	ZX(x) <sub>A</sub>	YZ(z) <sub>A</sub>	ZX(x) <sub>A</sub>
	98.3	80.0	68.2	94.9	74.0	69.0
YZ(y) <sub>A</sub>	YZ(z) <sub>A</sub>	XY(y) <sub>A</sub>	XY(y) <sub>A</sub>	ZX(x) <sub>A</sub>	ZX(x) <sub>A</sub>	YZ(z) <sub>A</sub>
	XY(y) <sub>A</sub>	YZ(z) <sub>A</sub>	ZX(x) <sub>A</sub>	XY(y) <sub>A</sub>	YZ(z) <sub>A</sub>	ZX(x) <sub>A</sub>
	ZX(z) <sub>A</sub>	XY(x) <sub>A</sub>	ZX(z) <sub>A</sub>	XY(x) <sub>A</sub>	ZX(z) <sub>A</sub>	XY(x) <sub>A</sub>
	98.3	68.2	80.0	94.9	94.3	95.9
YZ(z) <sub>A</sub>	YZ(y) <sub>A</sub>	XY(x) <sub>A</sub>	XY(x) <sub>A</sub>	ZX(z) <sub>A</sub>	ZX(z) <sub>A</sub>	YZ(y) <sub>A</sub>
	XY(x) <sub>A</sub>	YZ(y) <sub>A</sub>	ZX(z) <sub>A</sub>	XY(x) <sub>A</sub>	YZ(y) <sub>A</sub>	ZX(z) <sub>A</sub>
	ZX(x) <sub>A</sub>	XY(y) <sub>A</sub>	ZX(x) <sub>A</sub>	XY(y) <sub>A</sub>	ZX(x) <sub>A</sub>	XY(y) <sub>A</sub>
	95.9	68.2	51.6	74.0	94.3	98.3
ZX(z) <sub>A</sub>	XY(y) <sub>A</sub>	ZX(x) <sub>A</sub>	ZX(x) <sub>A</sub>	YZ(z) <sub>A</sub>	YZ(z) <sub>A</sub>	XY(y) <sub>A</sub>
	ZX(x) <sub>A</sub>	XY(y) <sub>A</sub>	YZ(z) <sub>A</sub>	ZX(x) <sub>A</sub>	XY(y) <sub>A</sub>	YZ(z) <sub>A</sub>
	XY(x) <sub>A</sub>	YZ(y) <sub>A</sub>	XY(x) <sub>A</sub>	YZ(y) <sub>A</sub>	XY(x) <sub>A</sub>	YZ(y) <sub>A</sub>
	69.0	80.0	51.6	94.3	74.0	98.3
ZX(x) <sub>A</sub>	XY(x) <sub>A</sub>	ZX(z) <sub>A</sub>	ZX(z) <sub>A</sub>	YZ(y) <sub>A</sub>	YZ(y) <sub>A</sub>	XY(x) <sub>A</sub>
	ZX(z) <sub>A</sub>	XY(x) <sub>A</sub>	YZ(y) <sub>A</sub>	ZX(z) <sub>A</sub>	XY(x) <sub>A</sub>	YZ(y) <sub>A</sub>
	XY(y) <sub>A</sub>	YZ(z) <sub>A</sub>	XY(y) <sub>A</sub>	YZ(z) <sub>A</sub>	XY(y) <sub>A</sub>	YZ(z) <sub>A</sub>
	69.0	51.6	80.0	94.3	94.9	95.9

表 6 手部把持方向 2 種かつ手継手回転軸 1 種の机上把持方向寄与率 (%)

	x軸	y軸	z軸
XY(x) <sub>A</sub>	ZX(x) <sub>A</sub>	YZ(z) <sub>A</sub>	XY(y) <sub>A</sub>
XY(y) <sub>A</sub>	ZX(z) <sub>A</sub> 69.0	YZ(y) <sub>A</sub> 68.2	XY(x) <sub>A</sub> 37.3
XY(x) <sub>A</sub>	ZX(x) <sub>A</sub>	YZ(z) <sub>A</sub>	XY(y) <sub>A</sub>
YZ(y) <sub>A</sub>	YZ(z) <sub>A</sub> 95.9	XY(y) <sub>A</sub> 68.2	ZX(x) <sub>A</sub> 94.9
XY(x) <sub>A</sub>	ZX(x) <sub>A</sub>	YZ(z) <sub>A</sub>	XY(y) <sub>A</sub>
YZ(z) <sub>A</sub>	YZ(y) <sub>A</sub> 95.9	XY(x) <sub>A</sub> 19.9	ZX(z) <sub>A</sub> 74.0
XY(x) <sub>A</sub>	ZX(x) <sub>A</sub>	YZ(z) <sub>A</sub>	XY(y) <sub>A</sub>
ZX(x) <sub>A</sub>	XY(x) <sub>A</sub> 46.6	ZX(z) <sub>A</sub> 51.6	YZ(y) <sub>A</sub> 94.9
XY(x) <sub>A</sub>	ZX(x) <sub>A</sub>	YZ(z) <sub>A</sub>	XY(y) <sub>A</sub>
ZX(z) <sub>A</sub>	XY(y) <sub>A</sub> 69.0	ZX(x) <sub>A</sub> 51.6	YZ(z) <sub>A</sub> 74.0
XY(y) <sub>A</sub>	ZX(z) <sub>A</sub>	YZ(y) <sub>A</sub>	XY(x) <sub>A</sub>
YZ(y) <sub>A</sub>	YZ(z) <sub>A</sub> 98.3	XY(y) <sub>A</sub> 48.3	ZX(x) <sub>A</sub> 94.9
XY(y) <sub>A</sub>	ZX(z) <sub>A</sub>	YZ(y) <sub>A</sub>	XY(x) <sub>A</sub>
YZ(z) <sub>A</sub>	YZ(y) <sub>A</sub> 98.3	XY(x) <sub>A</sub> 68.2	ZX(z) <sub>A</sub> 74.0
XY(y) <sub>A</sub>	ZX(z) <sub>A</sub>	YZ(y) <sub>A</sub>	XY(x) <sub>A</sub>
ZX(x) <sub>A</sub>	XY(x) <sub>A</sub> 69.0	ZX(z) <sub>A</sub> 80.0	YZ(y) <sub>A</sub> 94.9
XY(y) <sub>A</sub>	ZX(z) <sub>A</sub>	YZ(y) <sub>A</sub>	XY(x) <sub>A</sub>
ZX(z) <sub>A</sub>	XY(y) <sub>A</sub> 54.1	ZX(x) <sub>A</sub> 80.0	YZ(z) <sub>A</sub> 74.0
YZ(y) <sub>A</sub>	YZ(z) <sub>A</sub>	XY(y) <sub>A</sub>	ZX(x) <sub>A</sub>
YZ(z) <sub>A</sub>	YZ(y) <sub>A</sub> 62.6	XY(x) <sub>A</sub> 68.2	ZX(z) <sub>A</sub> 94.3
YZ(y) <sub>A</sub>	YZ(z) <sub>A</sub>	XY(y) <sub>A</sub>	ZX(x) <sub>A</sub>
ZX(x) <sub>A</sub>	XY(x) <sub>A</sub> 95.9	ZX(z) <sub>A</sub> 80.0	YZ(y) <sub>A</sub> 76.0
YZ(y) <sub>A</sub>	YZ(z) <sub>A</sub>	XY(y) <sub>A</sub>	ZX(x) <sub>A</sub>
ZX(z) <sub>A</sub>	XY(y) <sub>A</sub> 98.3	ZX(x) <sub>A</sub> 80.0	YZ(z) <sub>A</sub> 94.3
YZ(z) <sub>A</sub>	YZ(y) <sub>A</sub>	XY(x) <sub>A</sub>	ZX(z) <sub>A</sub>
ZX(x) <sub>A</sub>	XY(x) <sub>A</sub> 95.9	ZX(z) <sub>A</sub> 51.6	YZ(y) <sub>A</sub> 94.3
YZ(z) <sub>A</sub>	YZ(y) <sub>A</sub>	XY(x) <sub>A</sub>	ZX(z) <sub>A</sub>
ZX(z) <sub>A</sub>	XY(y) <sub>A</sub> 98.3	ZX(x) <sub>A</sub> 51.6	YZ(z) <sub>A</sub> 50.0
ZX(z) <sub>A</sub>	XY(y) <sub>A</sub>	ZX(x) <sub>A</sub>	YZ(z) <sub>A</sub>
ZX(x) <sub>A</sub>	XY(x) <sub>A</sub> 69.0	ZX(z) <sub>A</sub> 31.7	YZ(y) <sub>A</sub> 94.3

### 5.1.3 考察

最高把持方向寄与率は 98.3%の  $XY(y)_A$ ,  $YZ(y)_A$ ,  $YZ(z)_A$ ,  $ZX(z)_A$  の組み合わせであり, この組み合わせを義手機能選択の第一候補と考える. ただし,  $XY(y)_A$ ,  $YZ(y)_A$ ,  $YZ(z)_A$ ,  $ZX(z)_A$  の組み合わせの義手設計において課題がある. 手部把持方向 1 種かつ手継手回転軸 2 種で設計する場合, 同時に構成できる前腕座標系把持方向が 1 種に限られるため, 作業によっては手継手による肢位変更を頻繁に行う必要がある. 一方, 手部把持方向 2 種かつ手継手回転軸 1 種の場合は, 同時に実現できる前腕座標系把持方向が 2 種のため前述の課題が軽減されるが, 手部把持方向を 2 種ずつに分けて設計する必要があるため, 手継手の機構や外見において制限が発生する.  $XY(y)_A$ ,  $YZ(y)_A$ ,  $YZ(z)_A$ ,  $ZX(z)_A$  の組み合わせにおいては, 唯一  $XY(y)_A+ZX(z)_A$  の組み合わせについては簡易な機構で設計できるが, 手継手では  $YZ(y)_A+YZ(z)_A$  の組み合わせに変更することができない. 既存のフック型やハンド型ではない形式を採用する必要がある.

手部把持方向 1 種かつ手継手回転軸 1 種は必要となる機構が少ないために, 軽量化が図れる. 最高把持方向寄与率は 76.0%で手継手 z 軸回転の  $YZ(y)_A=ZX(x)_A$  (図 33) で,  $YZ(y)_A$  と  $ZX(x)_A$  の軸は連続しているため設計が容易であり, 手部把持方向 2 種の手継手として設計するほうが把持方向寄与率の向上が図れる. この組み合わせはフック型手先具に掌背屈機能を追加した義手と同様である.

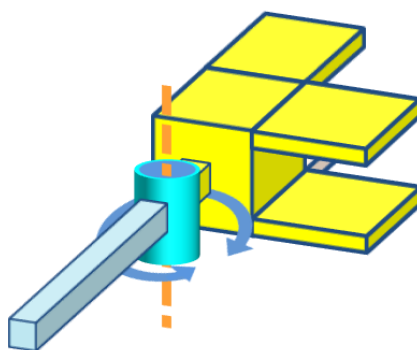


図 33 手継手 z 軸回転の  $YZ(y)_A=ZX(x)_A$

## 6. 市販の義手部品を組み合わせた前腕義手の評価

把持方向寄与率を用いて, 市販の手先具を評価する. 本研究ではフック型手先具と 1 自由度のハンド型手先具, 多自由度のハンド型手先具を挙げて, フック型手先具とハンド型手先具の比較と, ハンド型手先具の把持形態数 (1 自由度と多自由度) の比較を行った. フック型手先具として Hosmer #5X Hook (fillauer 社), 1 自由度ハンド型手先具として DMC Hand (ottobock 社), 多自由度のハンド型手先具として bebionic Hand (ottobock 社) を評価した. いずれも実際に処方される義手機能の評価するため, 手継手回内外機能 (手継手 y 軸回転機能) を付与した条件で比較

した.

フック型手先具 (図 31) は, 前述のように  $ZX_A$  面の把持方向 1 つと  $ZX_A$  面に垂直な面の把持方向 1 つ, 合計 2 つの把持方向を有する. Hosmer #5X Hook の把持方向の組み合わせは,  $YZ(y)_A+ZX(x)_A=XY(y)_A+ZX(z)_A$  であり, 表 6 を参照すると, 机上把持寄与率は 80.0% である. DMC Hand は, 第 1 指と第 2, 3 指の対立により,  $ZX_A$  面の把持方向を 1 つ有する. 把持方向は  $ZX(x)_A=ZX(z)_A$  であり, 表 4 を参照すると, 机上把持寄与率は 31.7% である. bebionic Hand (図 2 右下) は, 対立位での把持とラテラルピンチが可能である. 対立位での把持の把持方向は DMC Hand と異なる  $XY(x)_A=YZ(z)_A$  で, ラテラルピンチが DMC Hand の把持方向の  $ZX(x)_A=ZX(z)_A$  である. 2 つの把持形態について, 表 4 を参照すると, 机上把持寄与率は, 対立位での把持は 19.9% で, ラテラルピンチは 31.7% である.

フック型手先具は先端が細い鉤状の指を有しており, 巧緻性に優れるため作業に適していると考えられる. Haverkate らは義手使用者による Box and Blocks Test と Nine-Hole Peg test においてハンド型よりも好成績を記録していることを確認し, その原因としてフック型とハンド型の指先の細さの違いなどが挙げた<sup>35)</sup>. 本研究により, 把持方向寄与率による評価においてもフック型が優れていることが確認され, 義手使用者個人の力量に因らない具体的な数値を用いた義手の評価ができた. bebionic Hand は把持形態の変更機能により, 2 つの把持方向を有することで DMC Hand よりも高い把持方向寄与率を有するが, 2 つの把持方向の把持方向寄与率を合計してもフック型手先具に劣る. 把持形態を変える機能は手継手軸回転と同じく把持方向を増やし, 把持方向寄与率を向上させる手段として有効であることは確認された. また, 把持形態を 1 種追加する場合でも, 把持に寄与する能力に差が生じることが, 把持方向による分析で明らかとなった. 従来の研究では把持形態の増加のみを目的としていたために, 体幹座標系把持方向の重複に気づかないまま設計している可能性がある. 既存の方向と重複する場合, 重量やサイズに制限のある義手にとっては機能付与の効率が悪いと考えられる.

## 7. 把持方向寄与率にもとづく義手機能選択

義手設計において手部把持方向を増加させるには, 指同士の対立箇所を追加する方法と, フック型のように隣接する把持方向を兼任させる方法がある. 指同士の対立箇所を追加する方法の場合, 駆動関節軸を増やすための機構の追加や実装モータ数の追加が必要であり, 手先具の大型化や重量増加が避けられない. 一方, 隣接する把持方向を兼任させる方法は, 対立させる指の選択と指の角度の調整によって一つの把持機構で複数の把持方向を実現する方法であり, 駆動関節軸や実装モータ数の追加は必要ない. 義手の日常的な使用において手先具の大きさや重量は重要な因子であるため, 機構やモータの追加を必要としない方法を選択するとして, 隣接する把持方向面上で直交する把持方向軸を有する条件 (図 34) を抽出すると,  $XY(x)_A+YZ(z)_A$ ,  $XY(y)_A+ZX(z)_A$ ,

$YZ(y)_A+ZX(x)_A$  の 3 種が該当する。この 3 種の手先具を含む組み合わせのうち、最も机上把持方向寄与率の高い条件は手継手 x 軸の  $XY(x)_A+YZ(z)_A$  と  $YZ(y)_A+ZX(x)_A$  の 95.9%である。

手継手に回転軸を追加すると手部把持方向の数に応じて前腕座標系把持方向が増加する。手継手 1 軸の追加で期待できる前腕座標系把持方向の増加数は、手先具に手部把持方向 1 種を追加するよりも多い。手部把持方向 2 種以上を有する手先具を用いる場合において有用な方法である。また、より近位での機能追加の利点として、前腕にかかるモーメントの増加の抑制がある。手先具や手継手は断端より遠位に位置するため、機能追加に伴う重量増加は前腕へのモーメント増加につながるが、手継手は手先具より近位での機能追加が可能であるため、モーメント増加の抑制が可能である。

手継手の肢位変更機能は、各軸を中心とする扇形断面の柱（掌背屈、撓尺屈）または円柱（回内外）の空間を必要とする。必要な空間が少なくなる条件は、最近位の肢位変更機能を y 軸回転機能とした場合である。なお、この y 軸回転機能の動きは前腕回内外である。前腕の形状を模倣している前腕ソケットは、その筒状の遠位端に y 軸回転機能を収納することが可能であり、断端から手先具までの間に確保しなければならない空間が短いために長断端の場合も使用できる。一方、前腕長軸に対し直交する x 軸回転機能と z 軸回転機能が必要とする扇形断面の空間は y 軸回転機能が必要とする空間よりも長い距離であるため、長断端に装着すると、義手長が健常側よりも長くなる可能性がある。義手長が長くなると、前述した前腕へのモーメントも影響を受けるため、手継手への回転軸追加は必ずしも優先される方法ではないと考えられる。現在の x 軸回転または z 軸回転の機構の形状上、近位に y 軸回転機能を配置しても義手長への影響は少ないため、x 軸回転や z 軸回転のみを付与する利点は軽量化のみといえる。義手設計の際には、x 軸回転または z 軸回転機能を付与する場合は、基本的に y 軸回転機能を近位に付与すべきであると考えられる。

以上より、市販されている義手部品を用いた義手の構成は、手継手 y 軸回転機能を有し、隣接する把持方向面上で直交する把持方向軸を有する条件の手部把持方向 2 種の手先具を用いたものを選択すべきであるといえる。この条件において表 4-表 6 の中で最も机上把持方向寄与率が高いのは、 $YZ(y)_A+ZX(x)_A=XY(y)_A+ZX(z)_A$  の 80.0%であり、市販のフック型手先具と同様の組み合わせであるが、ハンド型手先具で市販されているものはない。ハンド型手先具でこの把持方向を実現する場合は、例として図 35 のように、第 1 指と第 5 指が対立する把持形態を採用する方法がある。なお、この第 1 指の掌側内転位は、従来のハンド型手先具のような第 2,3 指との対立より外観に劣る。したがって第 1 指の掌側内転位は、肢位変更機能などによる実現を提案する。

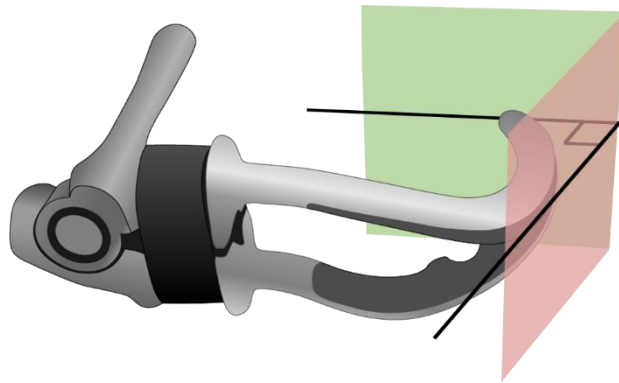


図 34 隣接する把持方向面上で直交する把持方向軸を有する条件  
フック型手先具を例に



図 35  $YZ(y)_A+ZX(x)_A=XY(y)_A+ZX(z)_A$  の実現例



## 第 4 章 把持実験による提案機能の評価

## 1. 目的

第2章の把持実験の結果から考察した把持遂行時間の短縮のための改善案をもとに、第3章にて過度の代償動作を抑制した条件下で机上把持方向寄与率にもとづいて義手の関節構成を提案した。そこで、提案した手先具および手継手の機能を満たす条件（以下、提案条件）と、既製の手先具および手継手で構成した条件（以下、既製条件）について、模擬筋電義手を用いた対象物把持実験にて把持遂行時間を比較し、把持方向が把持作業に与えた影響を調査することを目的とした。

## 2. 方法

日常生活における手の作業記録において把持対象となることが多かった缶、ペン、ノートの3種類を対象として、健常手と模擬筋電義手による把持遂行時間を計測した。対象者の把持作業を三次元動作解析装置（ノビテック社、VENUS3D）にて120 Hzで計測し、手を動かし始めてから対象物が持ち上げられるまでの時間を把持遂行時間として記録した。記録開始前に模擬筋電義手の練習を十分に行い、練習期間中に対象者は自らの判断で手継手を調整した。また、手先具把持部を限界まで開いた状態で記録を開始した。対象物3種の把持について健常手による把持を10回ずつ、模擬筋電義手による把持を5回ずつ計測した。対象物の順番はランダムで行った。被験者は健常な20台男性3名で、全員右利きであった。対象物の把持位置は出現回数の多かった同側とし、使用する模擬筋電義手は右手用であるため、対象物は右側に配置した。なお、本実験は東京電機大学ヒト生命倫理委員会の承認（受付番号02-08）を得て行った。

### 2.1 実験手順

実験手順は各被験者において、次の手順にて実施した。

- ① 実験実施者が対象物を初期位置に置く。
- ② 被験者が手部を初期位置に置く。
- ③ 被験者に記録開始の合図を出す。
- ④ 被験者は自分のタイミングで、初期位置から手の移動を開始する。
- ⑤ 被験者は対象物を把持し、机上から持ち上げる。
- ⑥ 被験者に記録終了の合図を出す。
- ⑦ ①から⑥を規定回数行う。

## 2.2 使用機器

対象物は 350ml 缶（高さ 122 mm×直径 60 mm）、ボールペン（長さ 140 mm×直径 12 mm）、B5 ノート（長辺 252 mm×短辺 179 mm×厚さ 7 mm）とした。対象物位置は、机天板の中心から 100 mm 右かつ天板手前端から 150 mm 奥とした。手部初期位置は、机天板の中心から 200 mm 右かつ机の天板手前端から 100 mm 奥とし、手部の遠位端とした。実験における机上の配置を図 37 に示す。なお、椅子の位置は、対象者の任意とした。

模擬筋電義手ソケットは第 2 章の実験で使用したものと同一ものを使用した（図 15）。提案条件の手継手機能である回内外は受動的に可能である。既製条件の手先具は、 $ZX(x)_A=ZX(z)_A$  である DMC ハンド（ottobock 社，71/2）を用いた（図 38）。DMC ハンド本体には第四，五指がなく，フォームカバーにて再現されている。第二，三指に追従する方法で第四，五指が動作する。フォームカバー装着時を再現するために第二，三指にアタッチメントを装着した。提案条件の手先具は，既製条件の DMC ハンドの第一指に  $XY(y)_A$  と  $YZ(y)_A$  の把持を可能にするアタッチメントを装着して  $XY(y)_A+ZX(z)_A=YZ(y)_A+ZX(z)_A$  を実現した（図 39）。両アタッチメントの指部長さや指先形状，指掌側の形状は DMC ハンドの形状と同様になるよう製作した（図 40）。

三次元動作解析用カメラは Flex13（NaturalPoint 社，1,280 × 1,024，120 Hz），記録用ソフトは Motive（NaturalPoint 社）を使用した。反射マーカは肩峰，肘頭部，手先，対象物（缶とペンは 1 箇所，ノートは 2 箇所）に貼付した。手先のマーカは健常手条件では第一指 MP 関節背側，模擬義手条件では第二，三指のアタッチメント背側に貼付した。



図 36 実験に使用した対象物（缶，ペン，B5 ノート）

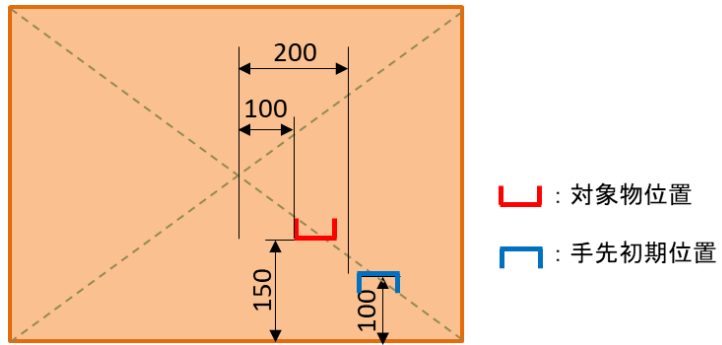


図 37 机上の対象物と手先初期位置 (mm)

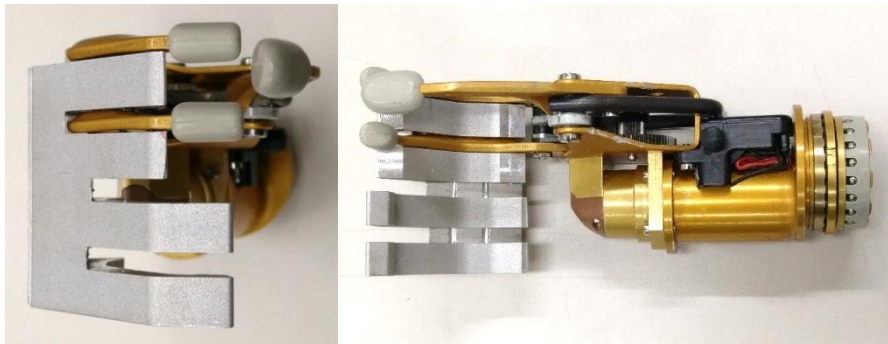


図 38 アタッチメントを装着した DMC ハンド (既製条件)

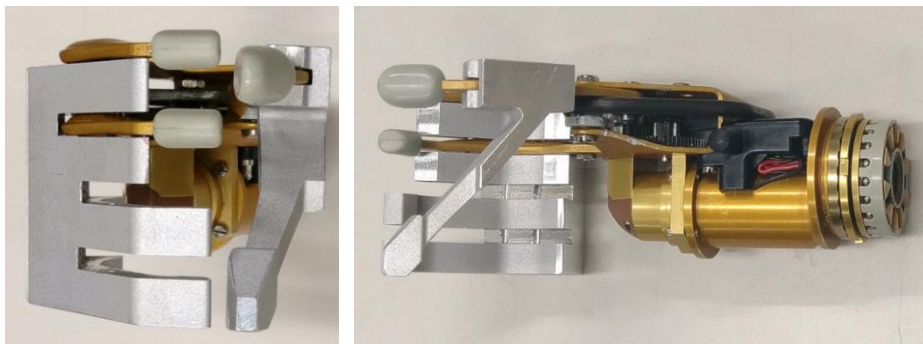


図 39 第一指アタッチメントを装着した DMC ハンド (提案条件)



図 40 アタッチメントの指腹側形状は DMC ハンドと同様

### 2.3 分析方法

三次元動作解析装置にて、対象者の肩峰、肘頭、手先に貼付したいずれかのマーカが変位した時点を把持作業開始、対象物に貼付したマーカが鉛直方向に変位した時点を把持遂行完了として、この期間を把持遂行時間とした（図 41）。

把持遂行時間についてフィッツの法則を用いて評価した。フィッツの法則は、「ヒトがデバイスを操作して対象となる領域に移動するのに必要な時間」と「対象部までの距離および対象物の大きさ」の関係を示したものであり、梶谷・大庭らが筋電義手の評価に用いている<sup>36-39)</sup>。フィッツの法則は式(2)で表される。 $T$ は動作遂行までの平均時間、 $\alpha$ は装置の開始・停止時間、 $\beta$ は速度に関わる係数である。 $\alpha$ と $\beta$ は対象者によって変動する値である。 $W$ は動きの方向に測った対象物の幅、 $D$ は開始地点から移動先地点の対象物中心までの距離である。

$$T = \alpha + \beta \log_2 \left( 1 + \frac{D}{W} \right) \quad \dots\dots(2)$$

健常手条件の場合は遅れがないものとして $\alpha$ を0に設定した。なお、実験に用いた手先具である DMC ハンドの応答時間は実験中の掌屈時期と手先具開閉時期から 0.1 s 程度であることを確認しており、模擬義手の $\alpha$ は0.1 であるとした。 $T$ は実験で得た把持遂行時間として $\beta$ を算出した。対象物ごとに 3 名の健常手条件の $\beta$ の中央値を算出し、健常者の予想把持遂行時間  $T_H$  を算出した。模擬筋電義手を用いた既製条件と提案条件については、各対象物の把持遂行時間の中央値で比較し、危険率 5%で Mann-Whitney の U 検定を行った。

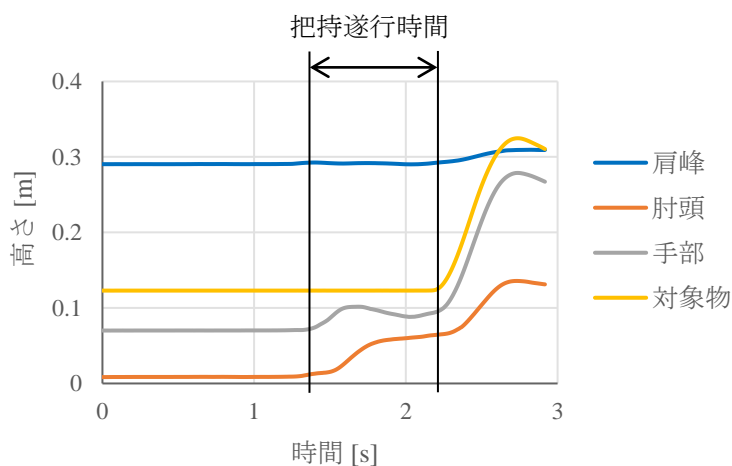


図 41 各マーカ高さの変移と把持遂行時間

### 3. 結果

健常手条件における各対象物の把持遂行時間の中央値は、缶が 0.77 s、ペンは 0.75 s、ノートが 1.08 s であった。これを基に算出した健常手での被検者の各対象物に対する予想把持遂行時間は、

缶が 0.57 s, ペンが 0.96 s, ノートが 1.25 s であった.

既製条件における各対象物の把持遂行時間の中央値は, 缶が 2.00 s, ペンが 2.86 s, ノートが 4.88 s であった. また, 提案条件における各対象物の把持遂行時間の中央値は, 缶が 1.95 s, ペンが 2.29 s, ノートが 4.92 s であった. 把持遂行時間の中央値と四分位範囲, 検定結果を図 42 に示す. ペンの把持において有意差 ( $p < 0.01$ ) を確認した.

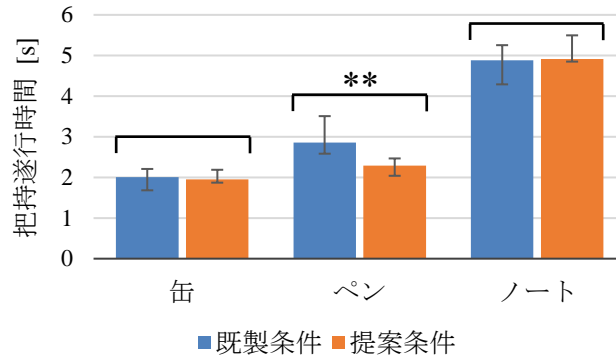


図 42 既製条件と提案条件の模擬筋電義手による把持遂行時間

#### 4. 考察

予想把持遂行時間  $T_H$  と健常手の把持遂行時間中央値との差は, 対象物の形状が影響していると考えられる. 対象物の形状は, 把持方向と把持形態に影響を与える因子である. 予想把持遂行時間  $T_H$  よりも時間がかかるほど把持の難易度が高いと考えられる.

模擬筋電義手の 2 条件を比較すると, ペンの把持において提案条件の把持遂行時間が既製条件よりも有意に短い. 筋電義手におけるフィットの法則の装置の開始・停止時間  $\alpha$  は, 筋電発生から手先具が閉じるまでの無駄時間と把持方向の調整に起因する代償動作を含む姿勢変更時間の合計値であるが, 既製条件と提案条件は, 同一の模擬筋電義手と DMC ハンドを使用しているため機器駆動系と操作系の応答特性における無駄時間に差はない. したがって, 姿勢変更に必要な時間が把持遂行時間の差の原因であると考えられる.

ペンの把持の試行の記録映像では, 既製条件でのみ図 43 のような肘を外転させる代償動作が確認された. 作業中の肘頭の変位を既製条件と提案条件から 1 試行ずつ抽出し, 図 44 に示す. 縦軸は高さ (机の天板高さを 0 とした), 横軸は把持作業開始から把持遂行完了までの正規化した時間である. 提案条件の肘頭は机天板より低い位置で推移しているが, 既製条件は把持作業開始後に肘頭位置が大きく上昇したことがマーカ位置によっても確認できた. そこで, 実験対象者 3 名 (s01, s02, s03) が行ったペンの把持について, 把持遂行時間内における肘頭の最高位置を抽出し, 各条件の中央値を比較した (図 45). 模擬筋電義手の肘頭の位置は健常手よりも低いため, 肩関節外転が確認されなかった提案条件は健常手条件よりも値が低い. 一方, 既製条件にお

ける肘頭の最高位置は全ての実験対象者で健常手条件と提案条件よりも高くなった。これは、ペンの把持に必要な体幹座標系把持方向が  $i\text{-XY}(y)_T$  であったことが原因と考えられる。提案条件は初期姿勢で体幹座標系把持方向  $i\text{-XY}(y)_T$ ,  $i\text{-ZX}(z)_T$ ,  $i\text{-YZ}(y)_T$ ,  $i\text{-ZX}(z)_T$  に対応しているが、既製条件は  $i\text{-ZX}(x)_T$  と  $i\text{-ZX}(z)_T$  のみである。既製条件のように対象物把持に必要な把持方向を有していない場合は、代償動作によって把持方向の実現可能範囲を広げる必要があり、追加された動作により把持遂行時間は長くなったと考えられる。なお、最小限の代償動作である肩関節と肘関節のみの肢位変更を条件とした MAP (表 1) を参照すると、既製条件の把持方向  $ZX(x)_A=ZX(z)_A$  では  $i\text{-XY}(y)_T$  を実現できないことがわかる。本実験の既製条件では、図 43 のように体幹の側屈を追加することによって把持方向の実現可能範囲を広げ、 $i\text{-XY}(y)_T$  を実現している。さらに追加した代償動作の分、把持遂行時間も長くなっていると考えられる。

本実験により、日常生活において出現回数の多かった対象物に対して、提案条件が既製の義手よりも小さな動作で把持できることを確認し、日常生活に貢献できることが示唆された。



図 43 ペンの把持作業において既製条件でのみ出現した代償動作

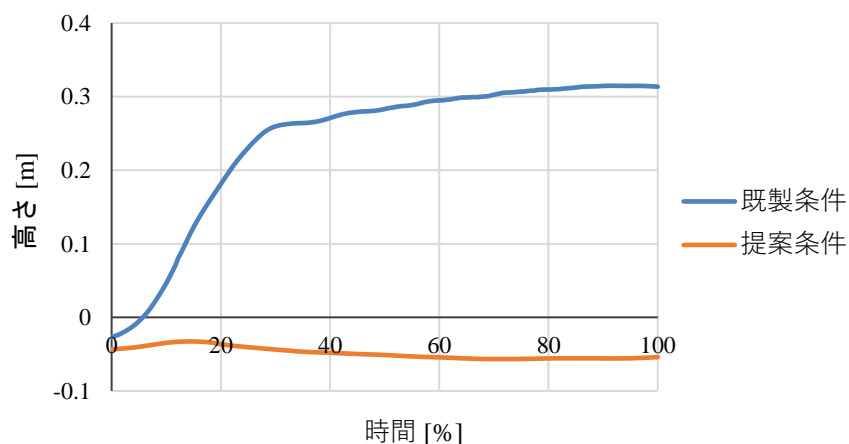


図 44 ペンの把持作業中の肘頭の高さ

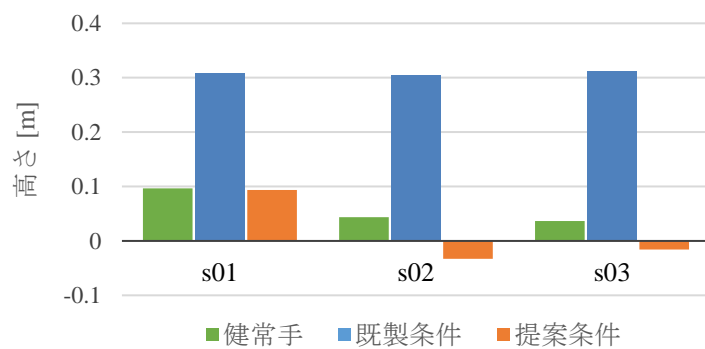


図 45 ペンの把持作業における肘頭の最高位置（中央値）



## 第 5 章 結論

本研究は、把持アプローチの計画にもとづく最適な義手の関節構成の分析を行い、義手に付与すべき機能を考察することを目的として、日常生活における把持方向寄与率を指標に手先具機能と手継手機能の組み合わせについて評価し、代償動作を抑制できる義手機能の選択を行った。本研究は、第1章3節2小節目の関連研究の項にて挙げた各研究で用いられた手の分類方法のどれにも属さない方法である把持方向による分類を用いて、新たな指標である把持方向寄与率による義手機能選択方法の可能性を示し、義手の関節構成を構築した。

研究の限界として、実験対象者数が3名と少数であり、全員20代男性の大学生であること、把持方向の分析対象が机上把持のみに限定されることが挙げられる。これに対し、以下の2つの理由から本研究の結果に一定の普遍性があると考えた。①机上作業の対象物が年齢や性別に大きく影響を受けないため。②日常生活において「座位中の机上対象物の把持」という作業が最も体幹の位置姿勢による代償が効かない条件下であり、これを記録して対応策を考えることが最も義手を改善する効果が高く、前腕切断者にとって動作選択を最も拡大しうる方法であるため。更なる普遍化のためには、実験対象者の年齢、性別、職業の種類、人数を増やし、対象動作を座位中の机上に限定せずすべての把持を分析する必要があると考えられる。また、本研究で行った把持方向による分類は、肢位や把持方向を90deg単位で分類したものであるため、手継手動作機能や手先具把持方向の考察には対応できるものの、義手製作時の手先具のアライメント調整のような微細な角度調整が必要な事柄には対応できない。これは把持方向の角度分類を細分化することで解決できると考えられるが、日常生活の自然な動作の記録における記録用機器の選択が容易ではなくなるという課題が発生する。

本研究の新規性を下記に示す。

- ・把持アプローチの計画を用いた、手の方向に着目した分類方法。
- ・手先具機能と手継手機能を同時かつ同じ重みで評価可能な指標。
- ・日常生活の記録から義手の関節構成を導出したこと。
- ・使用者の残存関節の代償動作を義手の関節構成の構築によって抑制したこと。
- ・義手使用者個人の力量に因らない数値を用いた義手の評価が可能になったこと。

把持方向による分類法の応用としては、Össur社のi-limb quantum(図2右下)のように数多くの肢位パターンから事前に使用する肢位を登録するような義手システムにおいて、把持寄与率による義手機能選択を行うことで、使用者に必要なかつ機能に重複のない肢位登録が可能となると考えている。また、把持方向による機能選択は義手のみならず、上肢装具や車椅子などの福祉機器の設計にも応用することが可能である。

# 謝辞

本研究の遂行にあたり、多大なご指導をいただいた東京電機大学大学院先端科学技術研究科教授大西謙吾先生，論文作成や研究発表にあたりご指導いただいた BionicM 株式会社の松原裕幸氏と産業技術総合研究所の梶谷勇氏，副査をしていただいた東京電機大学大学院先端科学技術研究科教授三井和幸先生，同教授本間彰彦先生，同准教授井上貴浩先生に深謝の意を表します。

実験機器の製作にご協力いただいた東京電機大学の杉田勝氏，本研究に対する助言や実験機器の製作にご協力いただいた同校バイオメカトロニクス研究室野口祐智氏，実験の施行やデータ整理にご協力いただいた同研究室の津田浩平氏をはじめ本研究の実験の実施に協力していただいた方々に深く感謝申し上げます。そして，実験に協力していただいた対象者の方々に感謝の意を表します。

最後に，実験の手伝いをしていただいた東京電機大学バイオメカトロニクス研究室内のメンバーに御礼申し上げます。

本研究は皆様の多大なるご協力のもとに，進めることができたものであり，改めてここに感謝申し上げます。

## 参考文献

- 1) 厚生労働省, 平成 13 年身体障害児・者実態調査結果, <https://www.mhlw.go.jp/houdou/2002/08/h0808-2.html>, 2021 年 1 月現在.
- 2) 厚生労働省, 平成 18 年身体障害児・者実態調査結果, <https://www.mhlw.go.jp/toukei/saikin/hw/shintai/06/index.html>, 2021 年 1 月現在.
- 3) Dillingham, T. R., Pezzin L. E., MacKenzie E. J., "Incidence, acute care length of stay, and discharge to rehabilitation of traumatic amputee patients: An epidemiologic study." *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 79(3), pp.279-287, (1998).
- 4) Belter, J. T., Dollar A. M., "Performance characteristics of anthropomorphic prosthetic hands." *IEEE Int Conf Rehabil Robot*, pp. (1)-(7), (2011).
- 5) 川村次郎, 福井信佳, 中川正己, 藤下武, 青山孝, 古川宏, "上肢切断者の現状と動向—近畿地区におけるアンケート調査から—." *リハビリテーション医学*, 36(6), pp.384-389, (1999).
- 6) 中島咲哉, 古川宏, "義手の処方・製作状況から見た実態 10 年間で何が変わったか." *日本義肢装具学会誌*, 15(4), pp.349-353, (1999).
- 7) 陳隆明, 柴田八衣子, 溝部二十四, 大庭潤平, "上肢切断に対するリハビリテーションチームアプローチとリハビリテーション目標." *日本義肢装具学会誌*, 29(4), pp.203-205, (2013).
- 8) 梶谷勇, 樋口哲也, "筋電義手開発のための義手に対する意識調査." *電子情報通信学会技術研究報告. MBE, ME とバイオサイバネティクス*, 101(130), pp.75-82, (2001).
- 9) Van Der Niet Otr, O., Reinders-Messelink H. A., Bongers R. M., Bouwsema H., Van Der Sluis C. K., "The i-LIMB Hand and the DMC Plus Hand Compared: A Case Report." *Prosthetics and Orthotics International*, 34(2), pp.216-220, (2010).
- 10) Dalley, S. A., Bennett D. A., Goldfarb M., "Preliminary functional assessment of a multigrasp myoelectric prosthesis." *Annu Int Conf IEEE Eng Med Biol Soc*, pp.4172-4175, (2012).
- 11) Childress, D. S., Weir R. F. f., *Control of limb Prostheses*, Smith, D. G., Michael J. W., Bowker J. H., "Atlas of Amputations and Limb Deficiencies: Surgical, Prosthetic, and Rehabilitation Principles, Third Edition." *Amer Academy of Orthopaedic*, pp.173-195, (2014).
- 12) Bullock, I., Feix T., Dollar A., "The Yale human grasping dataset: Grasp, object, and task data in household and machine shop environments." *The International Journal of Robotics Research*, 34, pp.251-255, (2014).
- 13) Kousaka, H., Mizoguchi H., Yoshikawa M., Tanaka H., Matsumoto Y., "Role Analysis of Dominant and Non-dominant Hand in Daily Life." (2013).
- 14) Schlesinger, G., "Der mechanische Aufbau der künstlichen Glieder." *Ersatzglieder und Arbeitshilfen*, pp.321-661, (1919).
- 15) Krausz, N., Rorrer R., Weir R., "Design and Fabrication of a Six Degree-of-Freedom Open Source Hand." *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 24,

- pp.562-572, (2016).
- 16) Blaubergs, M. S., Braine M. D., "Short-term memory limitations on decoding self-embedded sentences." *Journal of Experimental Psychology*, 102(4), pp.745-748, (1974).
  - 17) Controzzi, M., Clemente F., Barone D., Ghionzoli A., Cipriani C., "The SSSA-MyHand: A Dexterous Lightweight Myoelectric Hand Prosthesis." *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 25, pp.(1)-(10), (2016).
  - 18) Kargov, A., Pylatiuk C., Oberle R., Klosek H., Werner T., Roessler W., Schulz S., "Development of a Multifunctional Cosmetic Prosthetic Hand." *2007 IEEE 10th International Conference on Rehabilitation Robotics*, pp.550-553, (2007).
  - 19) Wattanasiri, P., Tangpornprasert P., Virulsri C., "Design of Multi-Grip Patterns Prosthetic Hand With Single Actuator." *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 26(6), pp.1188-1198, (2018).
  - 20) Napier, J. R., "THE PREHENSILE MOVEMENTS OF THE HUMAN HAND." *The Journal of Bone and Joint Surgery. British volume*, 38-B(4), pp.902-913, (1956).
  - 21) Landsmeer, J. M., "Power grip and precision handling." *Annals of the rheumatic diseases*, 21(2), pp.164-170, (1962).
  - 22) Kamakura, N., Matsuo M., Ishii H., Mitsuboshi F., Miura Y., "Patterns of Static Prehension in Normal Hands." *American Journal of Occupational Therapy*, 34(7), pp.437-445, (1980).
  - 23) Cutkosky, M. R., "On grasp choice, grasp models, and the design of hands for manufacturing tasks." *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 5(3), pp.269-279, (1989).
  - 24) Ohnishi, K., Tajima T., Saito Y., "Anthropomorphic hand control for robotic hand-arm system." *2000 IEEE international conference on systems, man and cybernetics*, 2, pp.1255-1259, (2000).
  - 25) 大西謙吾, 宮川浩臣, 田島孝光, 斎藤之男, "人間形ロボットハンドの高機能化に関する研究-ハンド・アームの動作分類を用いた接触覚センサベース制御-." *バイオメカニズム*, 16, pp.155-165, (2002).
  - 26) Parry, R., Macias Soria S., Pradat-Diehl P., Marchand-Pauvert V., Jarrassé N., Roby-Brami A., "Effects of Hand Configuration on the Grasping, Holding, and Placement of an Instrumented Object in Patients With Hemiparesis." *Frontiers in neurology*, 10, pp. (1)-(15), (2019).
  - 27) Dollar, A. M., "Classifying Human Hand Use and the Activities of Daily Living." *Springer International Publishing*, (2014).
  - 28) Carey, S. L., Jason Highsmith M., Maitland M. E., Dubey R. V., "Compensatory movements of transradial prosthesis users during common tasks." *Clinical Biomechanics*, 23(9), pp.1128-1135, (2008).
  - 29) 梶谷勇, 木下勝令, 三田友記, "手首機能を有する電動義手の評価." *福祉工学シンポジウム講演論文集*, 2007(0), pp.88-90, (2007).
  - 30) 岩田健司, 佐藤雄隆, 三田友記, 梶谷勇, "Lavatube による平易な動画像処理システムの構築とそれを用いた筋電義手の評価." *福祉工学シンポジウム講演論文集*, 2007(0), pp.91-94, (2007).
  - 31) 樋口凱, 昆恵介, 野坂利也, 早川康之, 敦賀建志, 白井允基, 松原裕幸, "健常手の運動

- 機能に近い前腕筋電義手開発の為の機能探索に関する実験的研究." 北海道科学大学研究紀要, 42, pp.163-168, (2016).
- 32) 川崎晴久, "ロボット工学の基礎." 森北出版株式会社, pp.56-64, (1991).
- 33) 福田浩士, 福村直博, 片山正純, 宇野洋二, "対象物の認知と手の把持形状の計算との関係-ヒトの把持運動への計算論的アプローチ." 電子情報通信学会論文誌. D-2, 情報・システム 2-パターン処理, 00082(00008), pp.1315-1326, (1999).
- 34) Iberall, T., "Human Prehension and Dexterous Robot Hands." *The International Journal of Robotics Research*, 16(3), pp.285-299, (1997).
- 35) Haverkate, L., Smit G., Plettenburg D., "Assessment of body-powered upper limb prostheses by able-bodied subjects, using the Box and Blocks Test and the Nine-Hole Peg Test." *Prosthetics and orthotics international*, 40(1), pp.109-116, (2014).
- 36) 梶谷勇, 大庭潤平, "フィッツの法則に基づく電動義手評価手法の解析." 第31回日本義肢装具学会大会講演集, p.165, (2015).
- 37) 梶谷 勇, "義手操作のパフォーマンス測定に関するヒューマンインタフェース的解析." 第32回日本義肢装具学会大会講演集, p.334, (2016).
- 38) 梶谷 勇, 大庭 潤平, 布川 清彦, "模擬義手を用いたヒト-支援機器系における身体知覚の評価手法の考察." ロボティクス・メカトロニクス講演会 2020, pp.(1)-(2), (2020).
- 39) 大庭潤平, 湯口泰輝, 荻野皐月, 梶谷勇, "フィッツの法則に基づく電動義手評価の検討～SHAP と STEF を用いて～." 第33回日本義肢装具学会大会講演集, p.254, (2017).

# 研究業績

## 1. 学術誌論文

- 1) 樋口凱, 大西謙吾, 松原裕幸, 梶谷勇: 日常生活における机上把持方向寄与率にもとづく義手機能選択, バイオメカニズム学会誌, 45(3), pp.164-171, 2021. (第3章)

## 2. 会議論文

- 1) Gai Higuchi, Kengo Ohnishi, Kohei Tsuda, Hiroyuki Matsubara, Isamu Kajitani, “Hand design priority based on cadence of grasping direction in deskwork,” 2019 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, pp.1516-1522, 2019. (第3章)

## 3. 学会発表

- 1) 樋口凱, 大西謙吾, 松原裕幸, 梶谷勇: 義手の第1指対立位置が机上把持の遂行時間に及ぼす影響, 第30回フロンティア講演会. (第4章)
- 2) 樋口凱, 大西謙吾, 松原裕幸, 梶谷勇: 日常生活における把持方向の出現頻度にもとづく義手の開発と評価, 第41回バイオメカニズム学術講演会, pp.(1)-(2), 2020. (第3章)
- 3) 樋口凱, 大西謙吾, 松原裕幸, 梶谷勇: 把持方向出現割合にもとづく前腕義手への手継手機能の付与優先順位の考察, 第36回日本義肢装具学会学術大会, p.146, 2020. (第3章)
- 4) Gai Higuchi, Kengo Ohnishi, Kohei Tsuda, Hiroyuki Matsubara, Isamu Kajitani. “Priority of Hand-shaped Prosthesis Design Based on Analysis of Daily Hand Activities”, ISPO 17th World Congress, p.524, 2019. (第3章6節)
- 5) 樋口凱, 大西謙吾, 津田浩平, 松原裕幸, 梶谷勇: 把持の遂行・継続時間にもとづく義手ハンドの許容把持遂行時間の考察, 第35回日本義肢装具学会学術大会, p.195, 2019. (第2章2節)
- 6) 樋口凱, 大西謙吾, 津田浩平, 松原裕幸, 梶谷勇: 日常生活動作の計測にもとづく義手機能の開発優先順位の考察, LIFE2018, pp.209-210, 2018. (第2章1節)

# 付録

本研究で行った実験のデータを記す.

## 付録目次

第2章第1節「日常生活において優先される手先具機能」 .....	1
第2章第2節「既製の義手による把持遂行時間」 .....	2
第3章第4節「日常生活における把持方向出現回数の抽出」 .....	6
第4章「把持実験による提案機能の評価」 .....	8



## 第2章第1節「日常生活において優先される手先具機能」

表 A2-1 手の動作の出現時間および出現回数

動作	時間(s)	回数
grasp	31100	1578
hook	3282	287
plate	586.5	194
stick	109.5	88
drag	220.5	173

表 A2-2 動作に使用した手の回数

使用手	回数
右手	1122
左手	596
両手	588

## 第2章第2節「既製の義手による把持遂行時間」

対象者は1名。縦軸はセンサから出力された電圧 (V)，横軸は時間 (s)。対象物初期位置の簡易フォースプレートセンサを OBJ，手部初期位置の簡易フォースプレートセンサを HND とした。

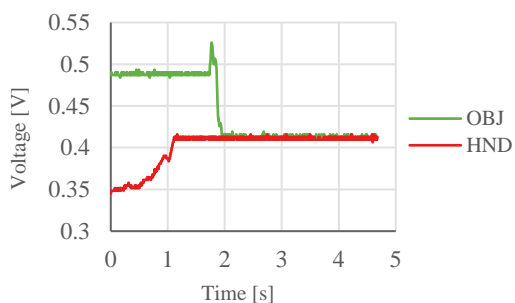


図 A2-1 健常手/缶 (1回目)

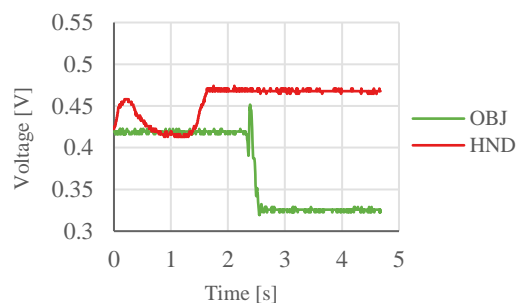


図 A2-2 健常手/缶 (2回目)

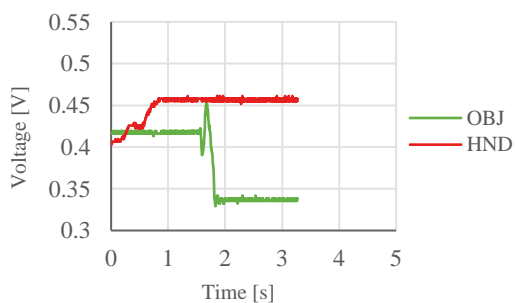


図 A2-3 健常手/缶 (3回目)

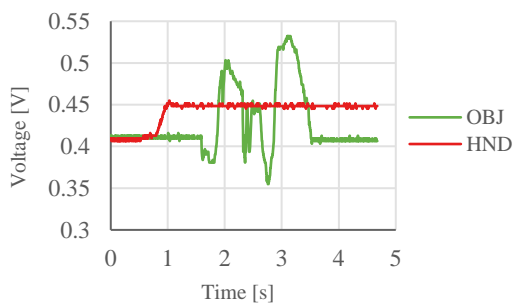


図 A2-4 健常手/ノート (1回目)

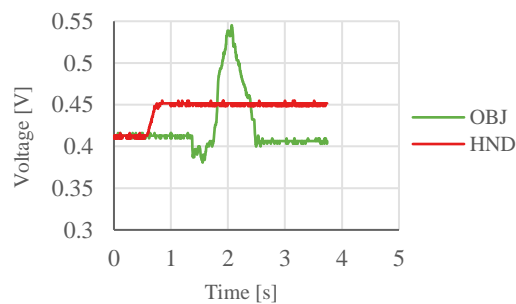


図 A2-5 健常手/ノート (2回目)

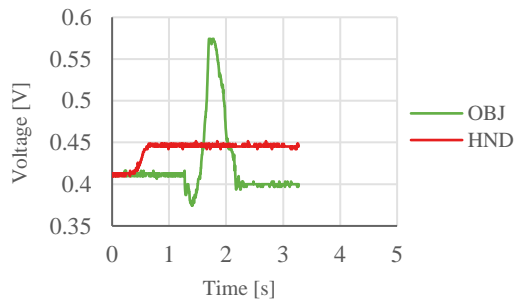


図 A2-6 健常手/ノート (3回目)

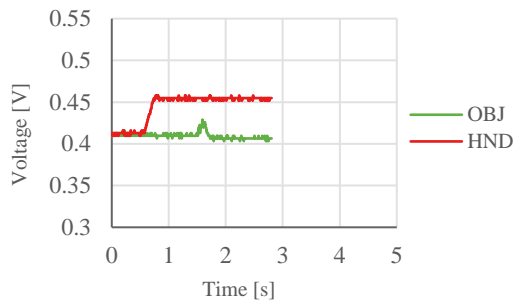


図 A2-7 健常手/ペン (1回目)

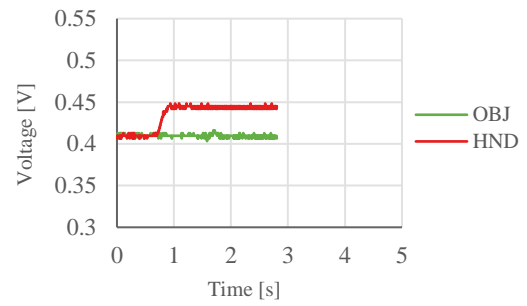


図 A2-8 健常手/ペン (2回目)

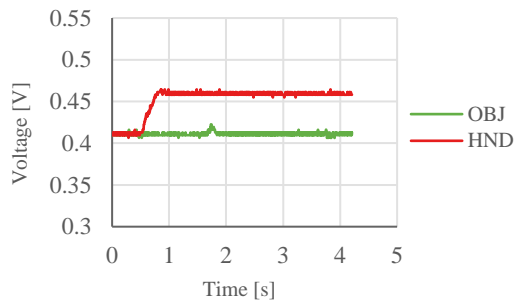


図 A2-9 健常手/ペン (3回目)

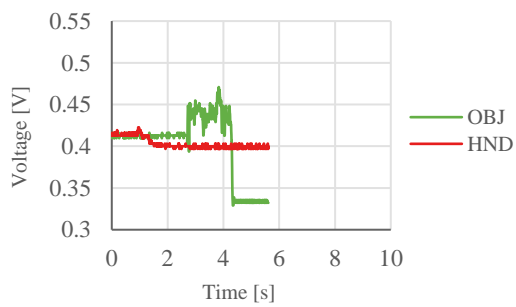


図 A2-10 模擬義手/缶 (1回目)

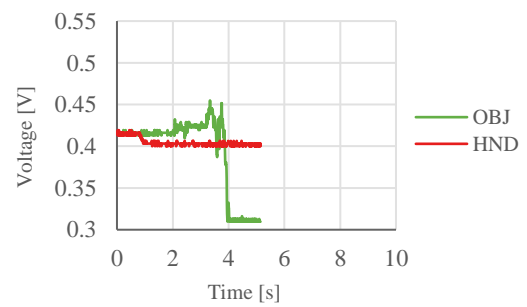


図 A2-11 模擬義手/缶 (2回目)

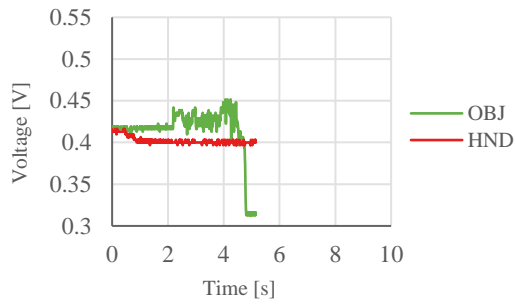


図 A2-12 模擬義手/缶 (3回目)

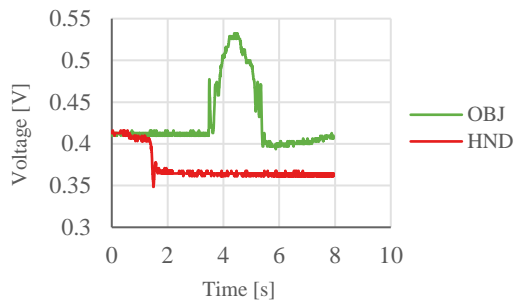


図 A2-13 模擬義手/ノート (1回目)

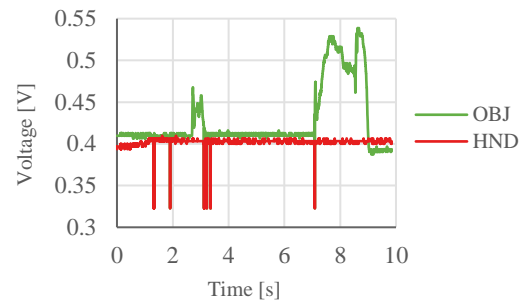


図 A2-14 模擬義手/ノート (2回目)

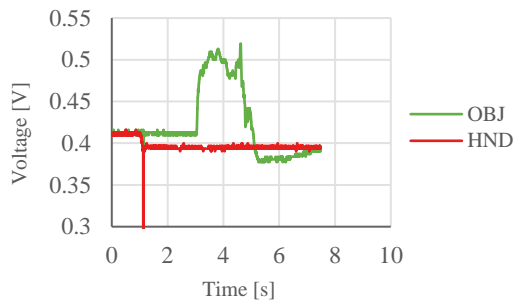


図 A2-15 模擬義手/ノート (3回目)

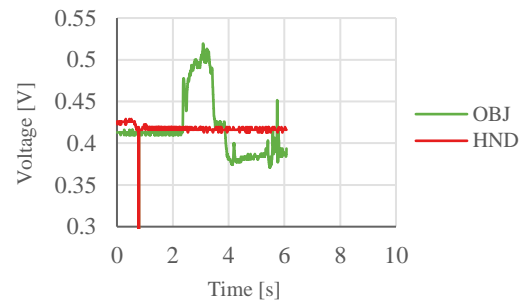


図 A2-16 模擬義手/ノート (5回目)

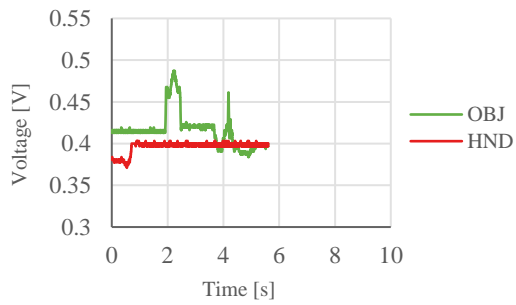


図 A2-17 模擬義手/ノート (10回目)

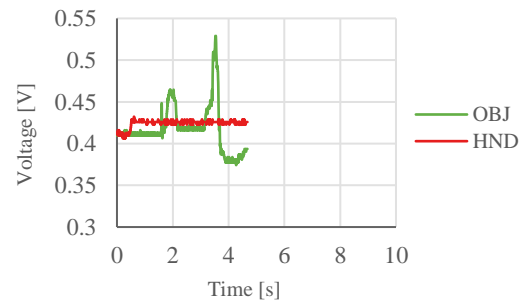


図 A2-18 模擬義手/ノート (15回目)

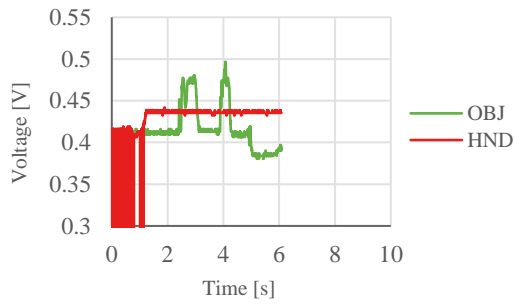


図 A2-19 模擬義手/ノート (20 回目)

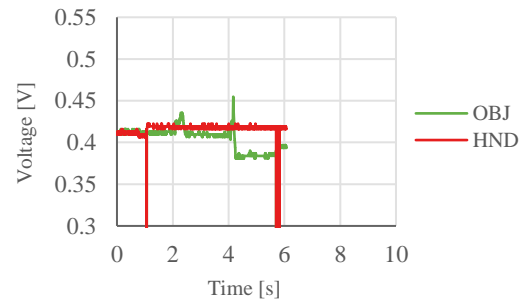


図 A2-20 模擬義手/ノート (25 回目)

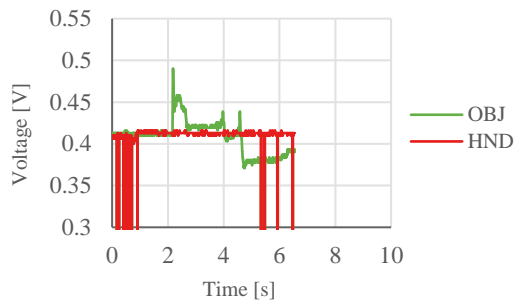


図 A2-21 模擬義手/ノート (30 回目)

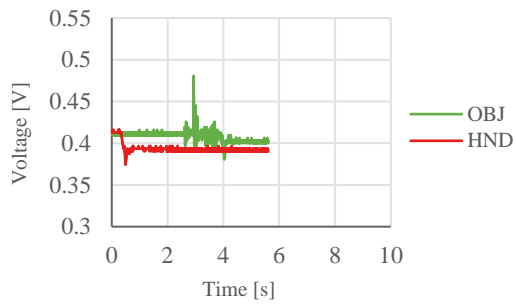


図 A2-22 模擬義手/ペン (1 回目)

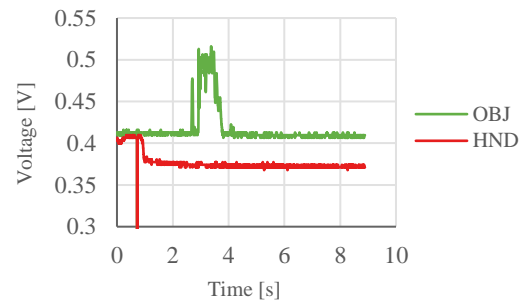


図 A2-23 模擬義手/ペン (2 回目)

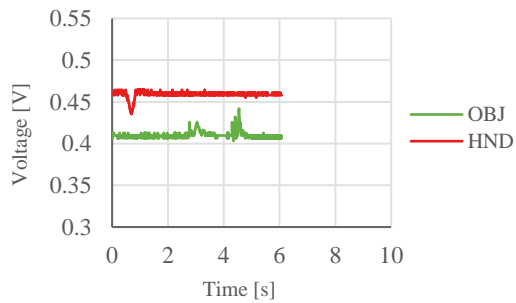


図 A2-24 模擬義手/ペン (3 回目)

### 第3章第4節「日常生活における把持方向出現回数の抽出」

表 A3-1 記録された体幹座標系把持方向と使用手, 把持位置の回数

使用手	体幹座標系 把持方向	左側位置 (回)	中央位置 (回)	右側位置 (回)
左手	XY(x) <sub>T</sub>	41	3	3
	XY(y) <sub>T</sub>	44	6	1
	YZ(y) <sub>T</sub>	180	6	20
	YZ(z) <sub>T</sub>	33	2	13
	ZX(x) <sub>T</sub>	128	10	23
	ZX(z) <sub>T</sub>	11	6	8
右手	XY(x) <sub>T</sub>	10	7	89
	XY(y) <sub>T</sub>	16	6	163
	YZ(y) <sub>T</sub>	2	21	147
	YZ(z) <sub>T</sub>	6	7	30
	ZX(x) <sub>T</sub>	7	8	67
	ZX(z) <sub>T</sub>	0	6	98
両手	XY(x) <sub>T</sub>	0	0	0
	XY(y) <sub>T</sub>	1	3	2
	YZ(y) <sub>T</sub>	0	8	1
	YZ(z) <sub>T</sub>	0	2	0
	ZX(x) <sub>T</sub>	0	1	0
	ZX(z) <sub>T</sub>	0	0	0

表 A3-2 表 A3-1 の両手条件, 中央位置条件を再分類(分類方法は p.31 参照)

使用手	体幹座標系 把持方向	左側位置 (回)	右側位置 (回)
左手	XY(x) <sub>T</sub>	41	6
	XY(y) <sub>T</sub>	45	12
	YZ(y) <sub>T</sub>	180	35
	YZ(z) <sub>T</sub>	33	17
	ZX(x) <sub>T</sub>	128	34
	ZX(z) <sub>T</sub>	11	14
右手	XY(x) <sub>T</sub>	17	89
	XY(y) <sub>T</sub>	26	165
	YZ(y) <sub>T</sub>	31	148
	YZ(z) <sub>T</sub>	15	30
	ZX(x) <sub>T</sub>	16	67
	ZX(z) <sub>T</sub>	6	98

表 A3-3 表 A3-2 をもとに使用手と把持位置の関係について分類(分類方法は p.31 参照)

使用手	体幹座標系 把持方向	回数
同側把持 i-	XY(x) <sub>T</sub>	130
	XY(y) <sub>T</sub>	210
	YZ(y) <sub>T</sub>	328
	YZ(z) <sub>T</sub>	63
	ZX(x) <sub>T</sub>	195
	ZX(z) <sub>T</sub>	109
反対側把持 c-	XY(x) <sub>T</sub>	23
	XY(y) <sub>T</sub>	38
	YZ(y) <sub>T</sub>	66
	YZ(z) <sub>T</sub>	32
	ZX(x) <sub>T</sub>	50
	ZX(z) <sub>T</sub>	20

## 第4章「把持実験による提案機能の評価」

3名の実験対象者をそれぞれ S01, S02, S03 とした。縦軸はマーカの高さ, 横軸は時間 (s)。各マーカについて, 肩峰を SHO, 肘頭を ELB, 手先を HND, 対象物を OBJ (ノートは OBJ1, OBJ2) とした。

なお, 計測に失敗した試行 (図 A4-107) は, 以降の処理から除いた。

### ・ S01

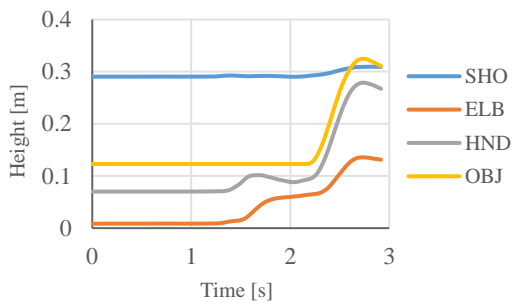


図 A4-1 S01 健常手/缶 (1/10)

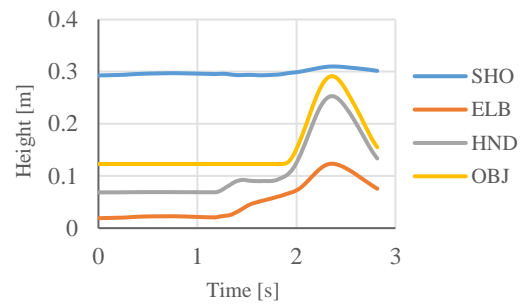


図 A4-2 S01 健常手/缶 (2/10)

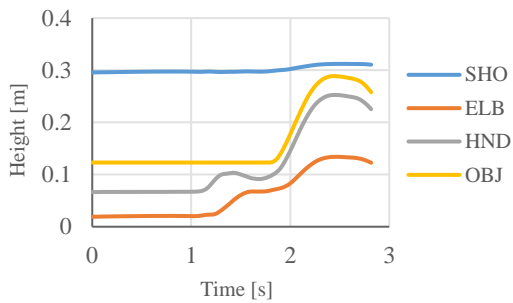


図 A4-3 S01 健常手/缶 (3/10)

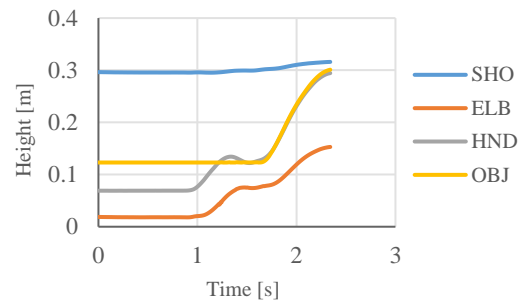


図 A4-4 S01 健常手/缶 (4/10)

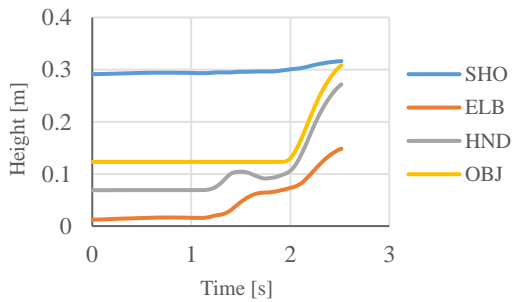


図 A4-5 S01 健常手/缶 (5/10)

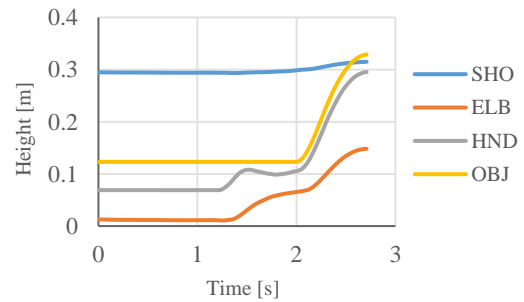


図 A4-6 S01 健常手/缶 (6/10)



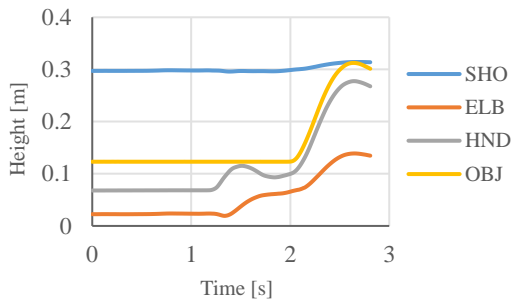


図 A4-7 S01 健常手/缶 (7/10)

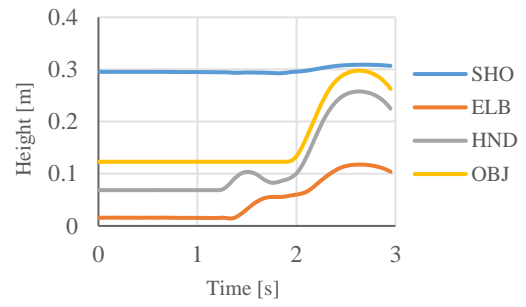


図 A4-8 S01 健常手/缶 (8/10)

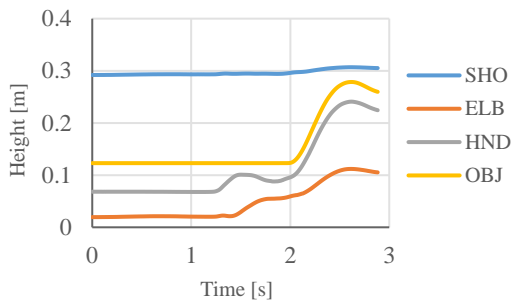


図 A4-9 S01 健常手/缶 (9/10)

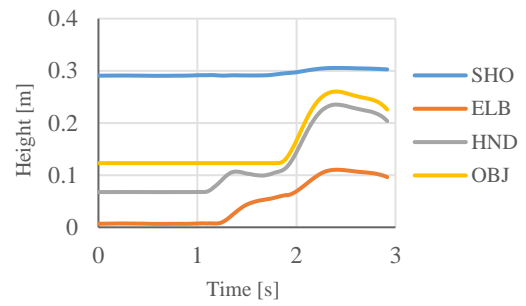


図 A4-10 S01 健常手/缶 (10/10)

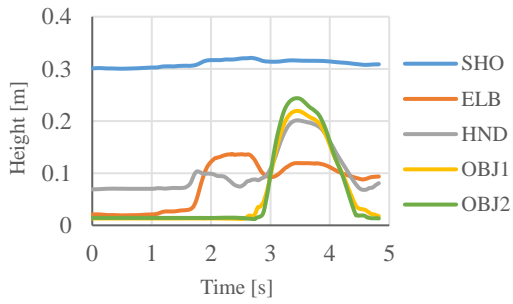


図 A4-11 S01 健常手/ノート (1/10)

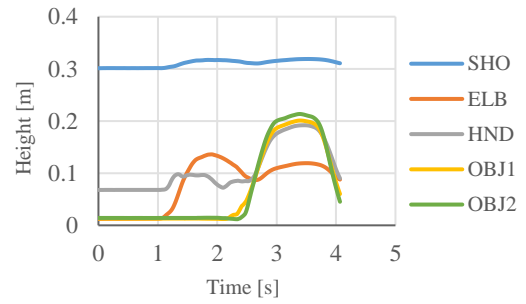


図 A4-12 S01 健常手/ノート (2/10)

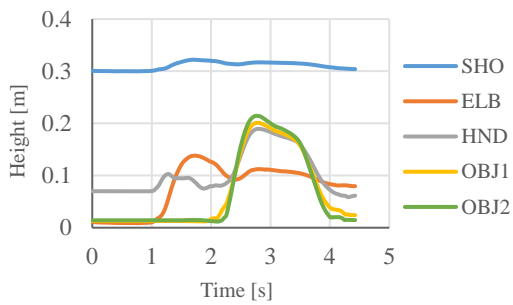


図 A4-13 S01 健常手/ノート (3/10)

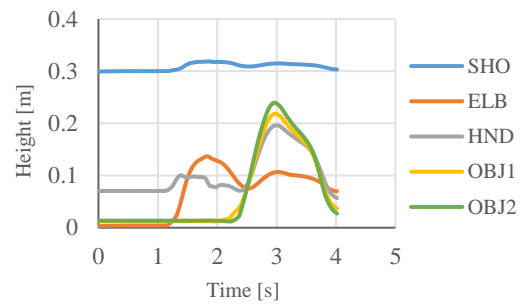


図 A4-14 S01 健常手/ノート (4/10)

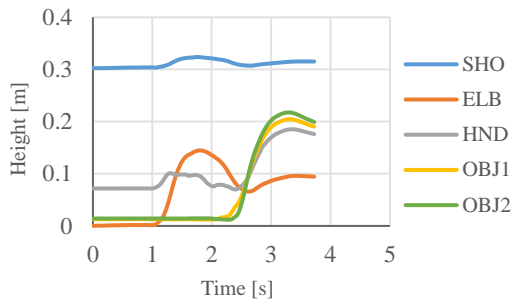


図 A4- 15 S01 健常手/ノート (5/10)

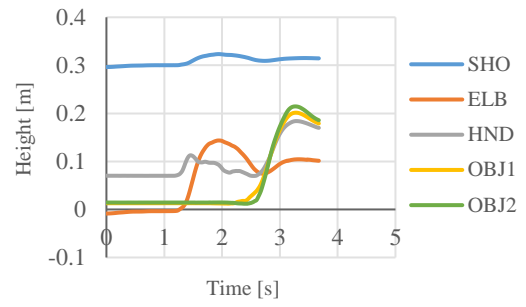


図 A4- 16 S01 健常手/ノート (6/10)

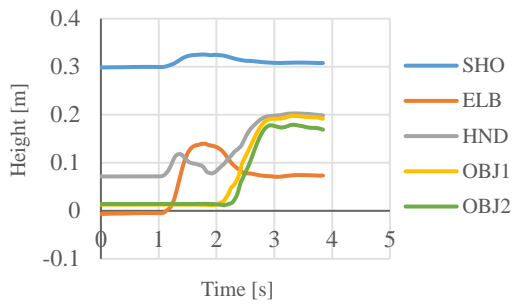


図 A4- 17 S01 健常手/ノート (7/10)

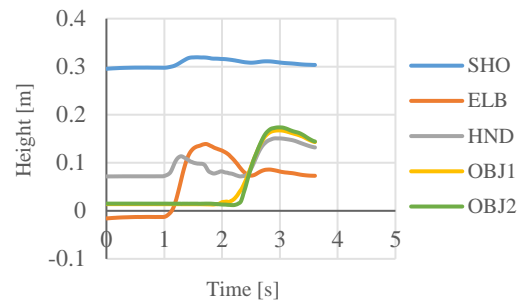


図 A4- 18 S01 健常手/ノート (8/10)

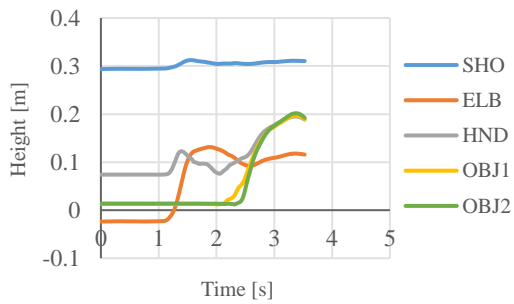


図 A4- 19 S01 健常手/ノート (9/10)

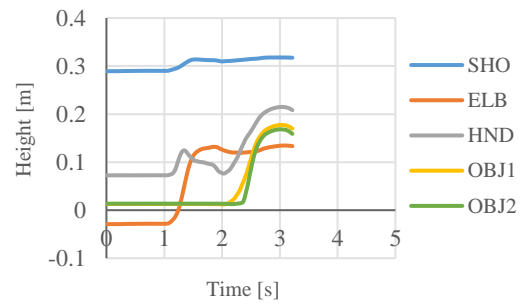


図 A4- 20 S01 健常手/ノート (10/10)

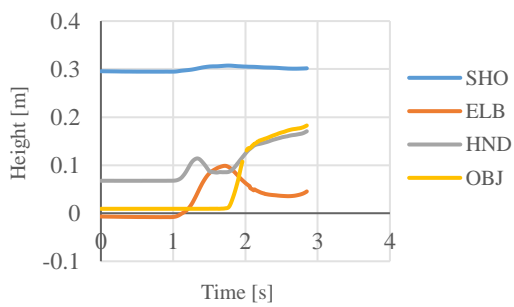


図 A4- 21 S01 健常手/ペン (1/10)

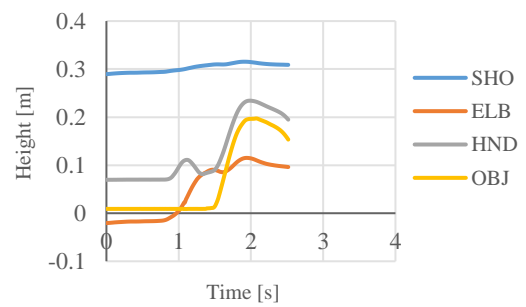


図 A4- 22 S01 健常手/ペン (2/10)

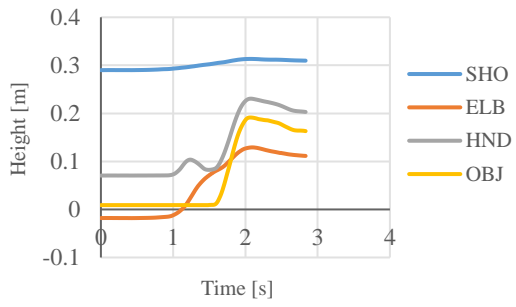


図 A4-23 S01 健常手/ペン (3/10)

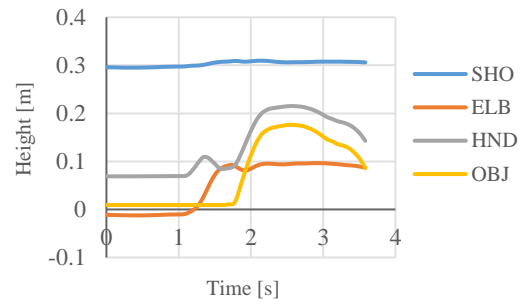


図 A4-24 S01 健常手/ペン (4/10)

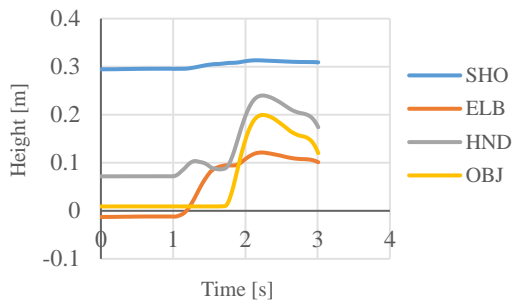


図 A4-25 S01 健常手/ペン (5/10)

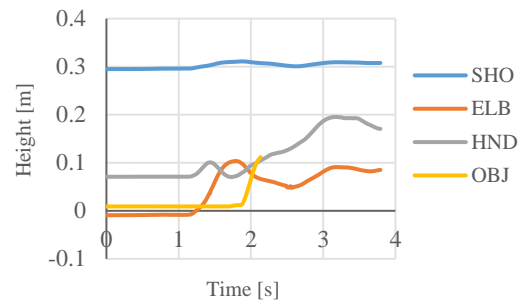


図 A4-26 S01 健常手/ペン (6/10)

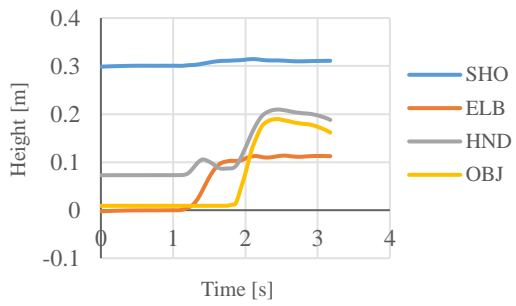


図 A4-27 S01 健常手/ペン (7/10)

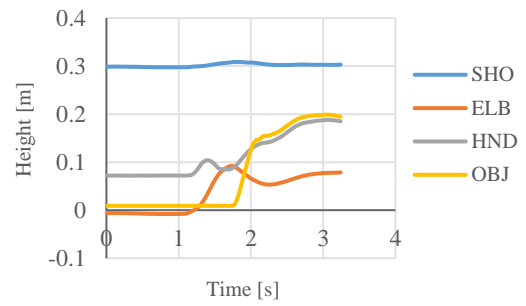


図 A4-28 S01 健常手/ペン (8/10)

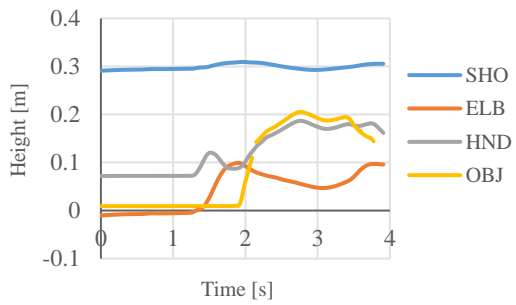


図 A4-29 S01 健常手/ペン (9/10)

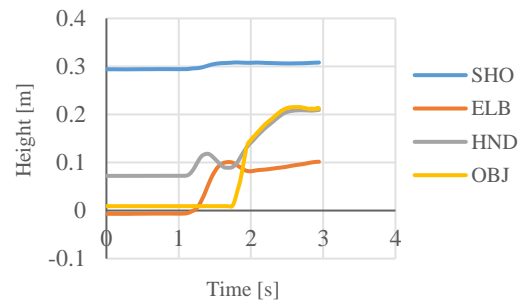


図 A4-30 S01 健常手/ペン (10/10)

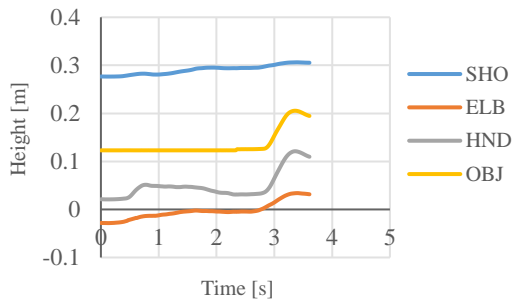


図 A4-31 S01 提案条件/缶 (1/5)

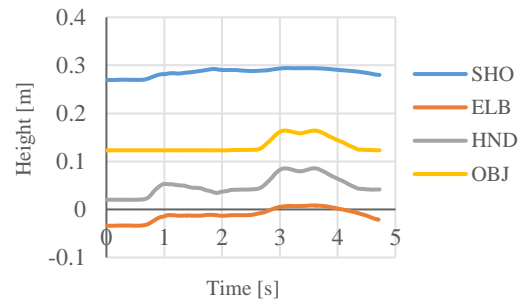


図 A4-32 S01 提案条件/缶 (2/5)

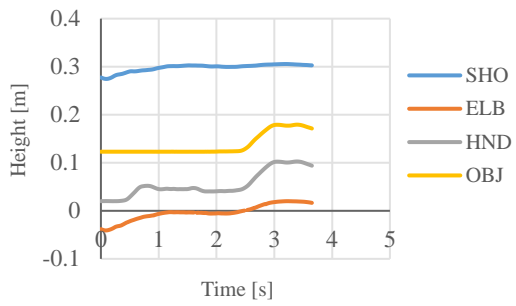


図 A4-33 S01 提案条件/缶 (3/5)

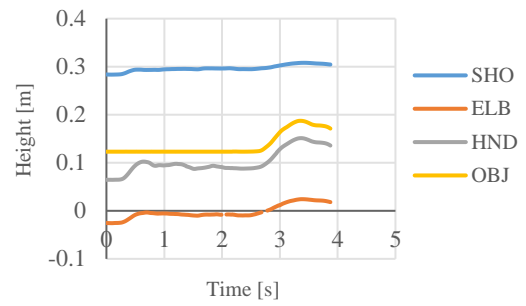


図 A4-34 S01 提案条件/缶 (4/5)

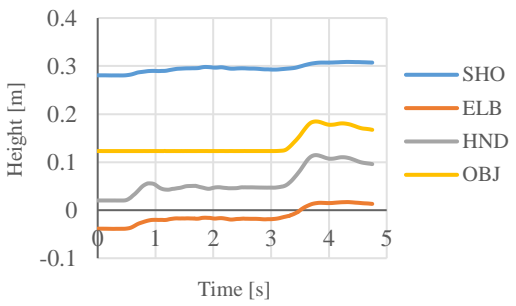


図 A4-35 S01 提案条件/缶 (5/5)

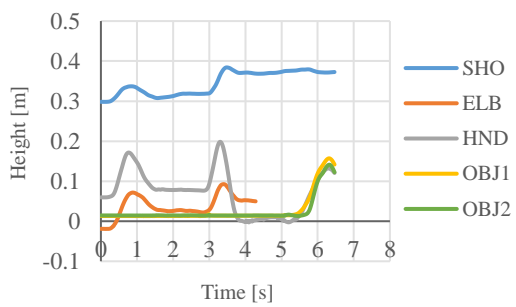


図 A4-36 S01 提案条件/ノート (1/5)

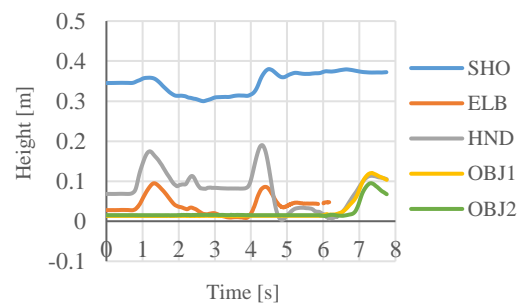


図 A4-37 S01 提案条件/ノート (2/5)

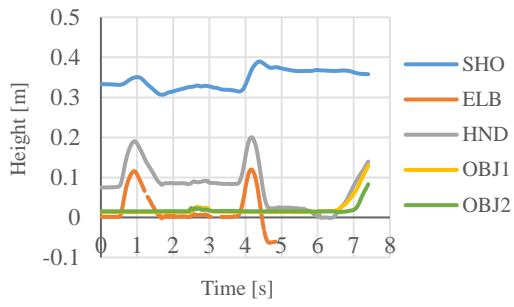


図 A4-38 S01 提案条件/ノート (3/5)

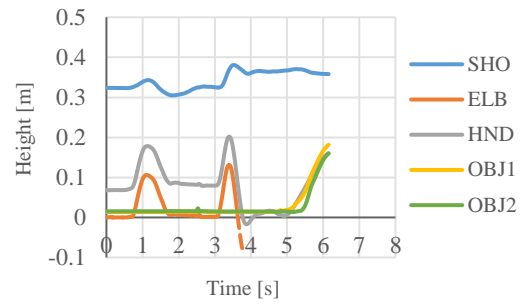


図 A4-39 S01 提案条件/ノート (4/5)

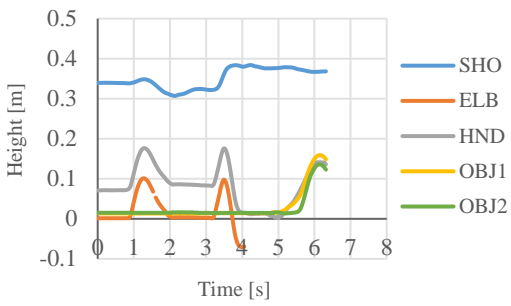


図 A4-40 S01 提案条件/ノート (5/5)

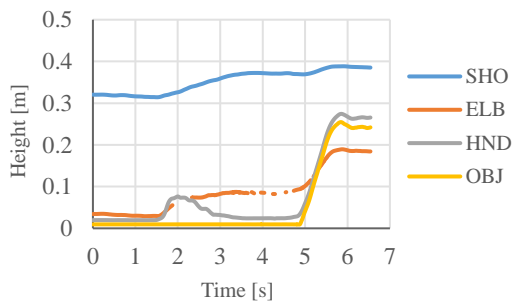


図 A4-41 S01 提案条件/ペン (1/5)

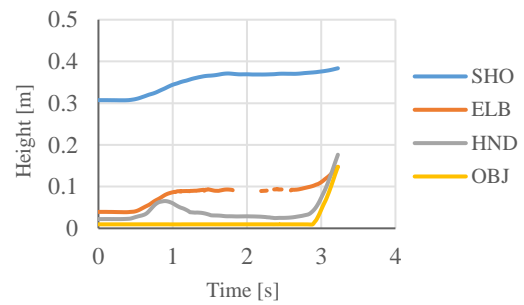


図 A4-42 S01 提案条件/ペン (2/5)

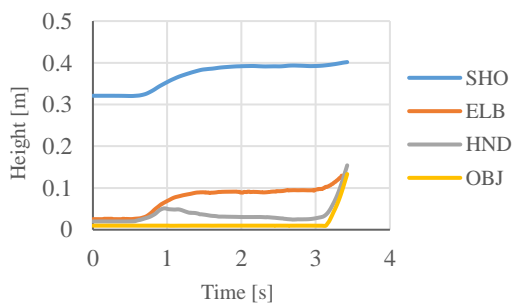


図 A4-43 S01 提案条件/ペン (3/5)

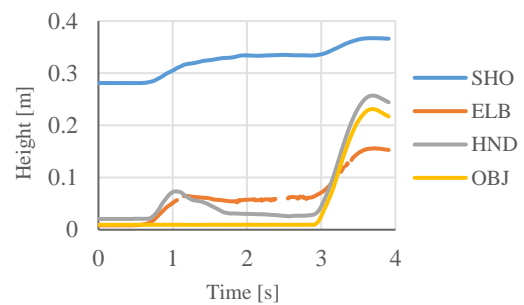


図 A4-44 S01 提案条件/ペン (4/5)

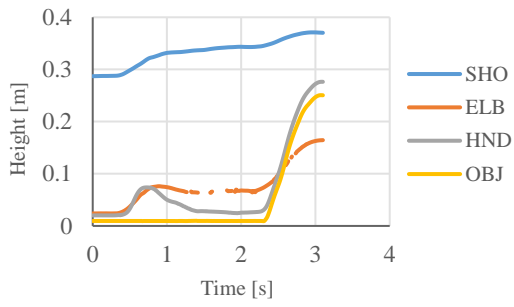


図 A4-45 S01 提案条件/ペン (5/5)

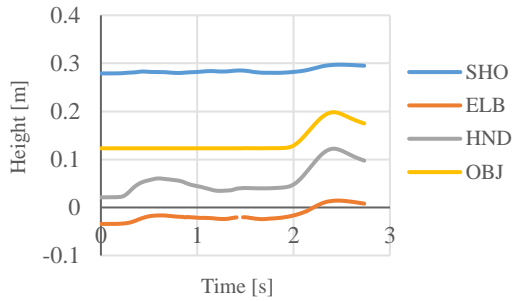


図 A4-46 S01 既製条件/缶 (1/5)

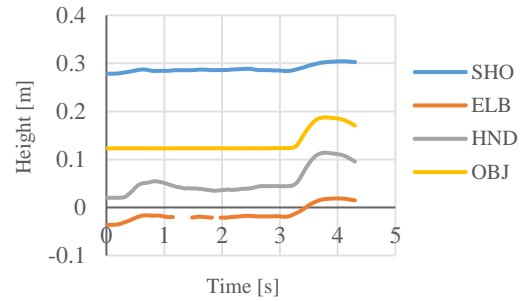


図 A4-47 S01 既製条件/缶 (2/5)

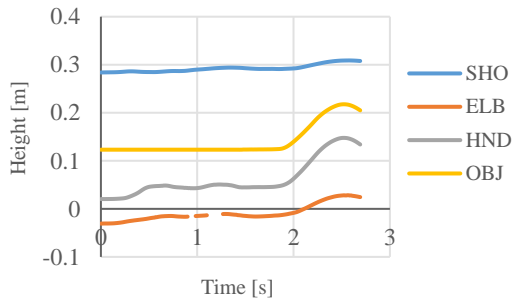


図 A4-48 S01 既製条件/缶 (3/5)

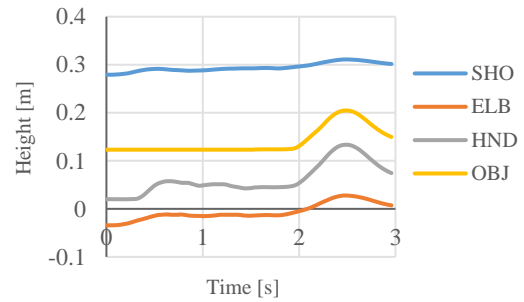


図 A4-49 S01 既製条件/缶 (4/5)

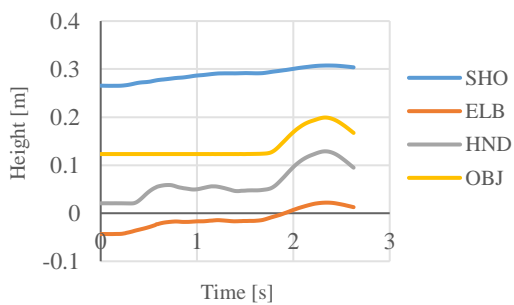


図 A4-50 S01 既製条件/缶 (5/5)

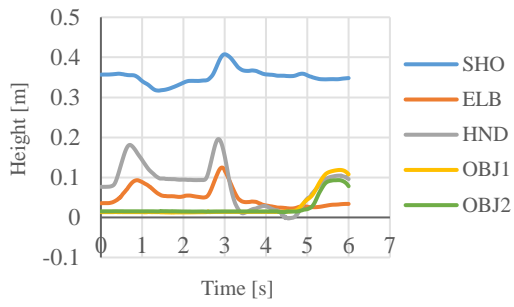


図 A4- 51 S01 既製条件/ノート (1/5)

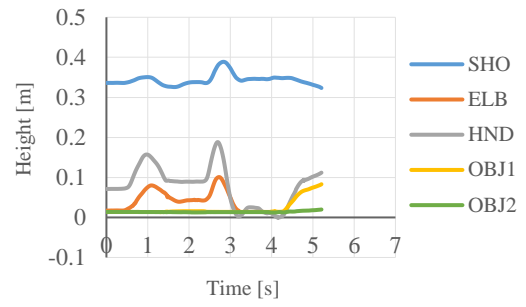


図 A4- 52 S01 既製条件/ノート (2/5)

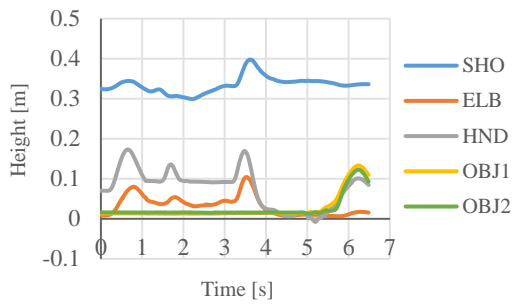


図 A4- 53 S01 既製条件/ノート (3/5)

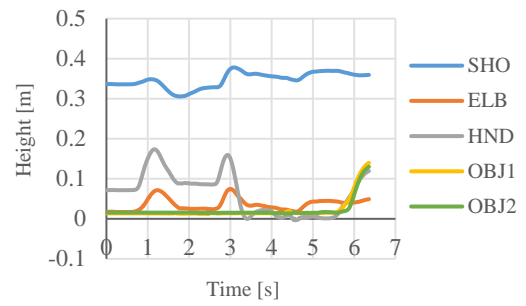


図 A4- 54 S01 既製条件/ノート (4/5)

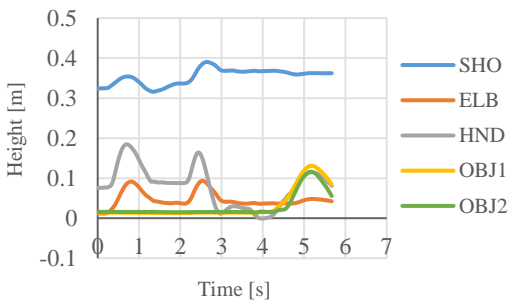


図 A4- 55 S01 既製条件/ノート (5/5)

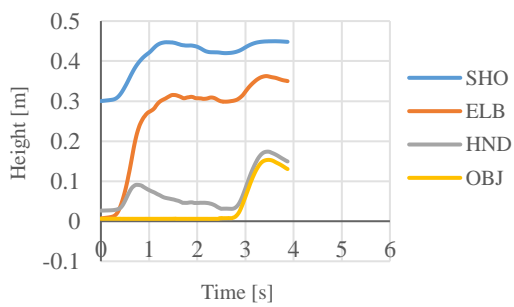


図 A4- 56 S01 既製条件/ペン (1/5)

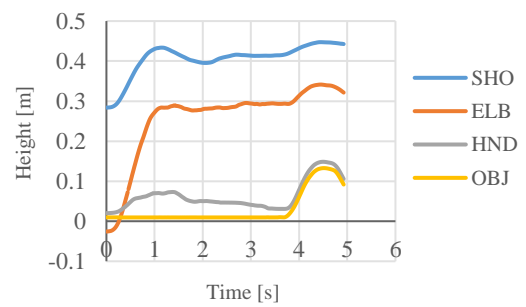


図 A4- 57 S01 既製条件/ペン (2/5)

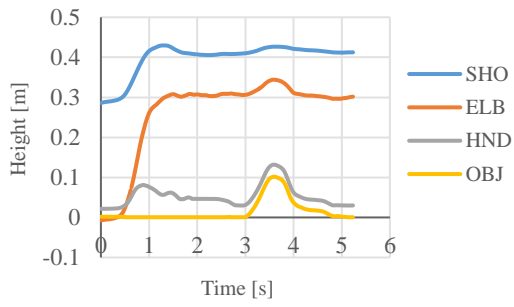


図 A4- 58 S01 既製条件/ペン (3/5)

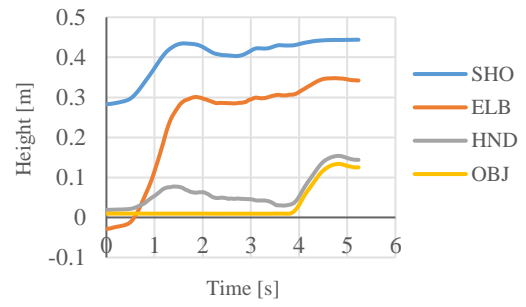


図 A4- 59 S01 既製条件/ペン (4/5)

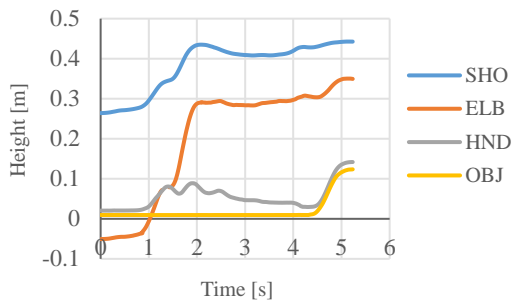


図 A4- 60 S01 既製条件/ペン (5/5)

• S02

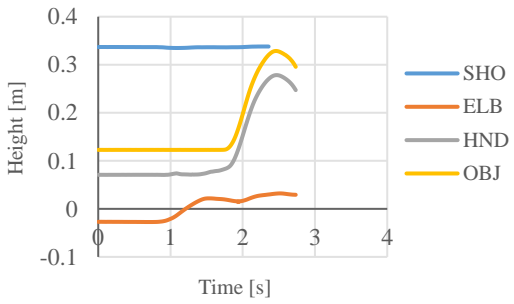


図 A4- 61 S02 健常手/缶 (1/10)

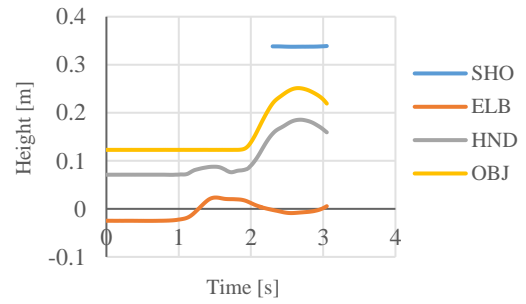


図 A4- 62 S02 健常手/缶 (2/10)

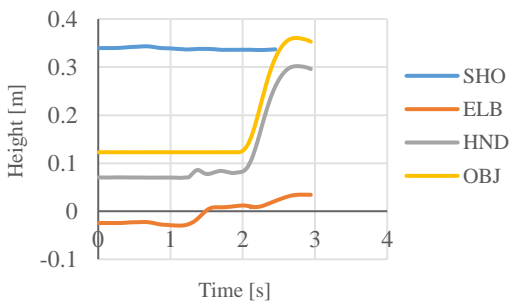


図 A4- 63 S02 健常手/缶 (3/10)

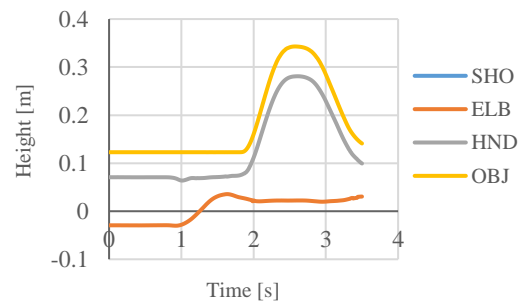


図 A4- 64 S02 健常手/缶 (4/10)



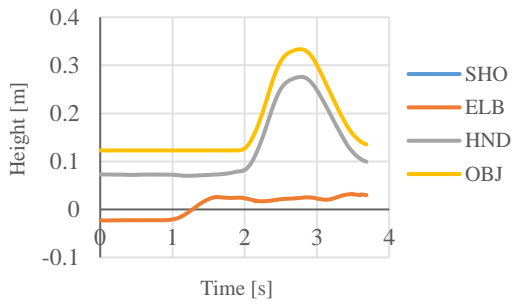


図 A4- 65 S02 健常手/缶 (5/10)

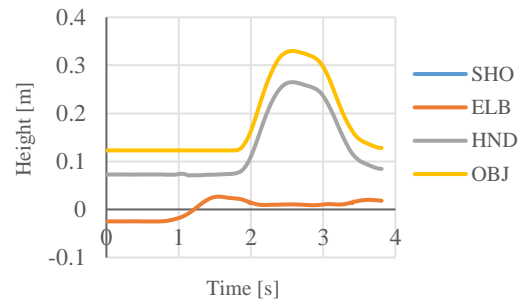


図 A4- 66 S02 健常手/缶 (6/10)

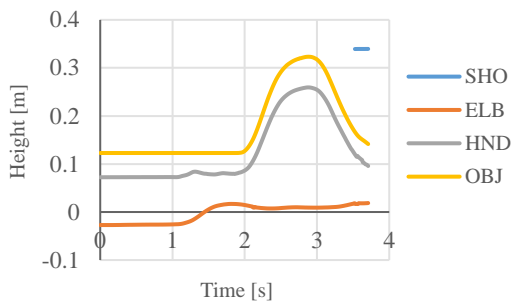


図 A4- 67 S02 健常手/缶 (7/10)

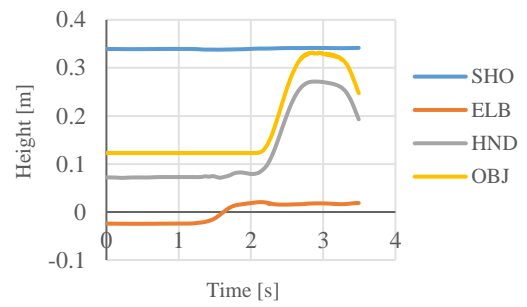


図 A4- 68 S02 健常手/缶 (8/10)

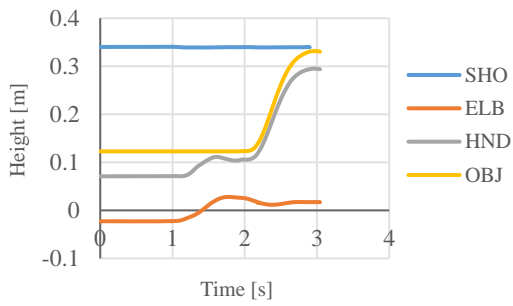


図 A4- 69 S02 健常手/缶 (9/10)

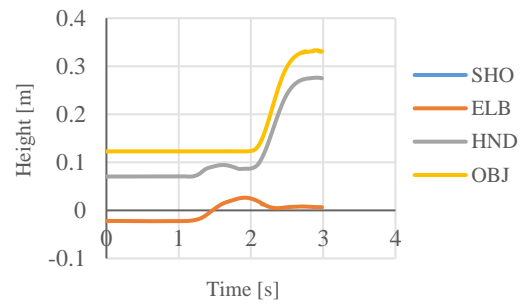


図 A4- 70 S02 健常手/缶 (10/10)

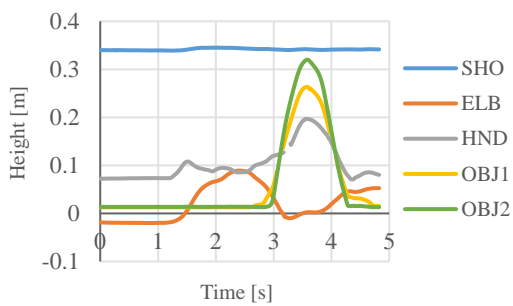


図 A4- 71 S02 健常手/ノート (1/10)

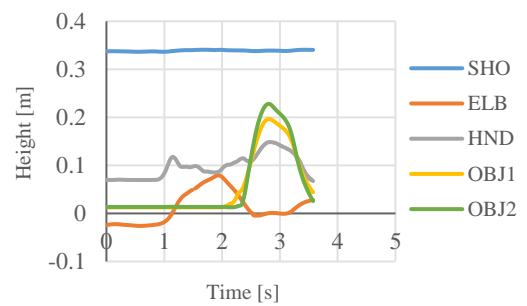


図 A4- 72 S02 健常手/ノート (2/10)

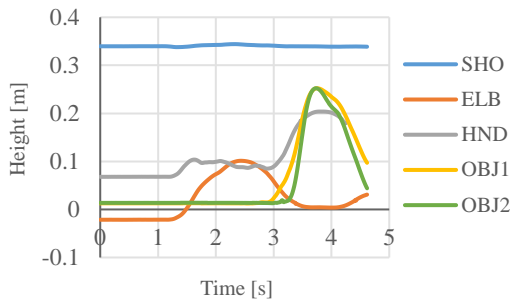


図 A4-73 S02 健常手/ノート (3/10)

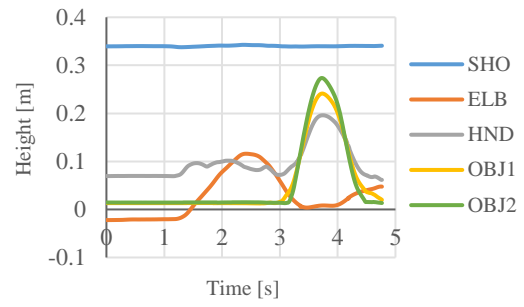


図 A4-74 S02 健常手/ノート (4/10)

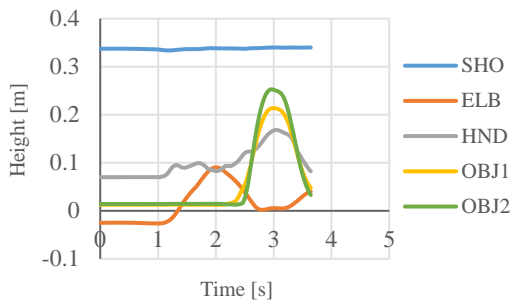


図 A4-75 S02 健常手/ノート (5/10)

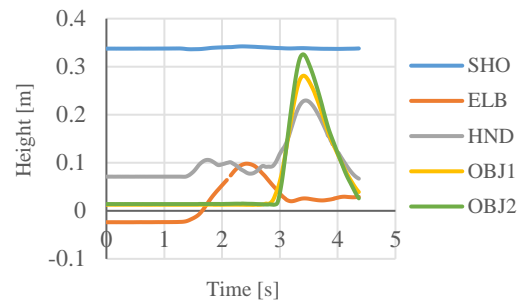


図 A4-76 S02 健常手/ノート (6/10)

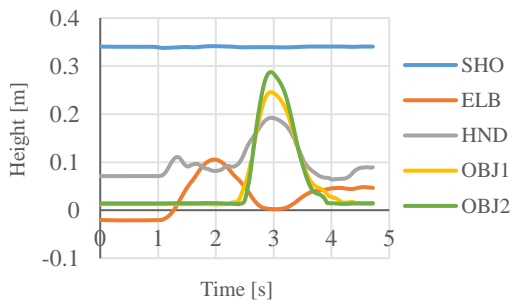


図 A4-77 S02 健常手/ノート (7/10)

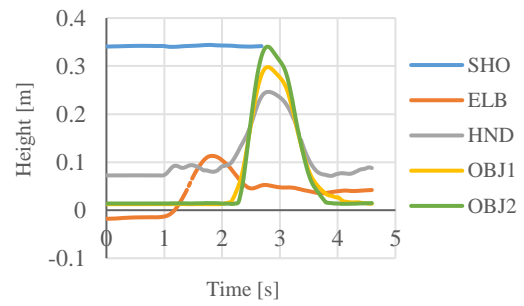


図 A4-78 S02 健常手/ノート (8/10)

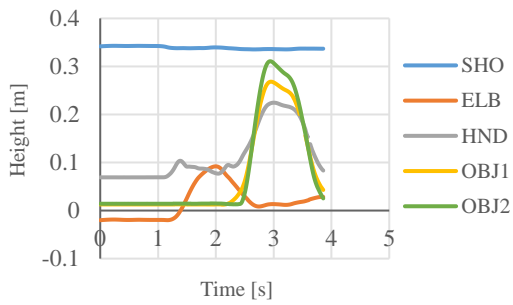


図 A4-79 S02 健常手/ノート (9/10)

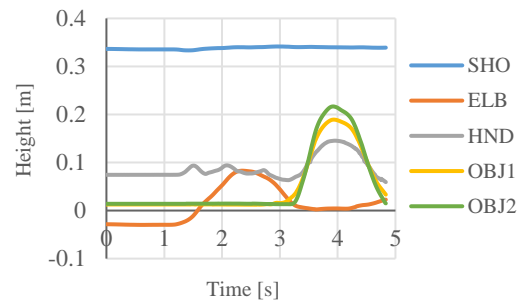


図 A4-80 S02 健常手/ノート (10/10)

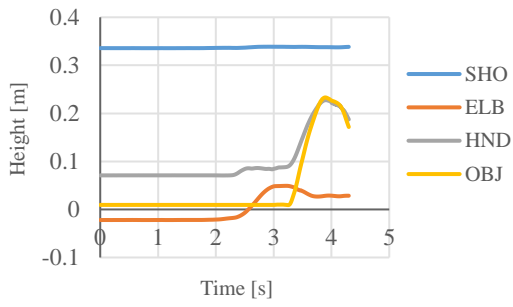


図 A4- 81 S02 健常手/ペン (1/10)

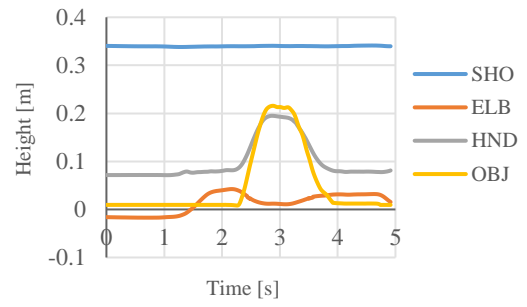


図 A4- 82 S02 健常手/ペン (2/10)

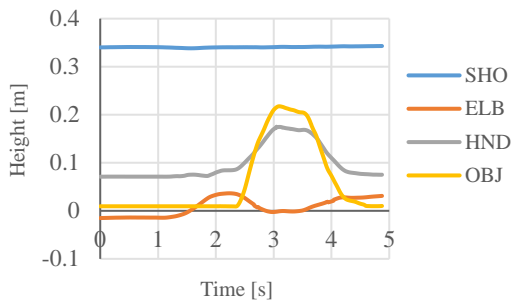


図 A4- 83 S02 健常手/ペン (3/10)

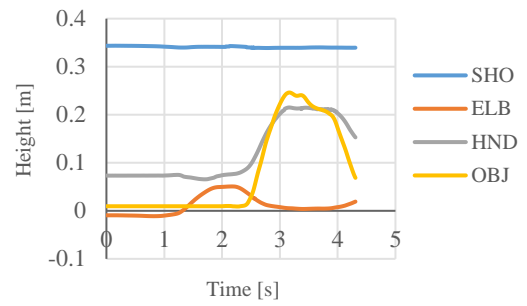


図 A4- 84 S02 健常手/ペン (4/10)

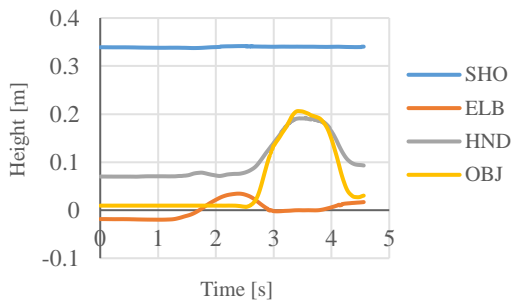


図 A4- 85 S02 健常手/ペン (5/10)

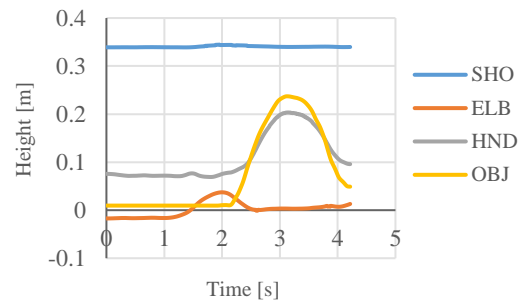


図 A4- 86 S02 健常手/ペン (6/10)

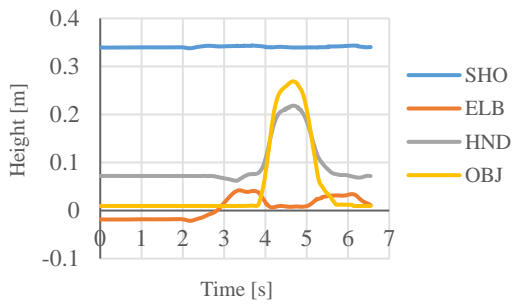


図 A4- 87 S02 健常手/ペン (7/10)

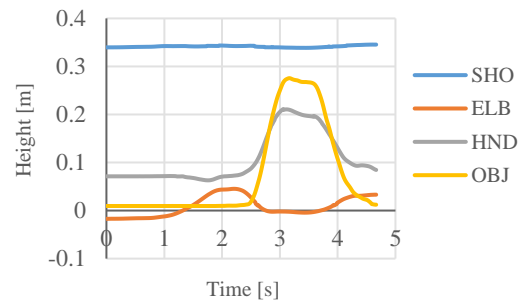


図 A4- 88 S02 健常手/ペン (8/10)

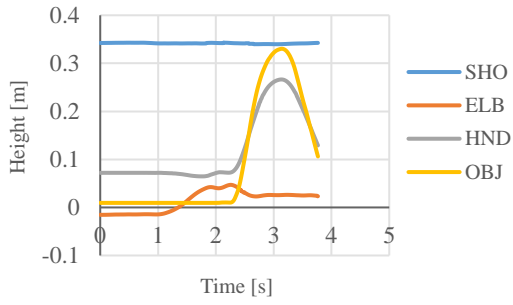


図 A4- 89 S02 健常手/ペン (9/10)

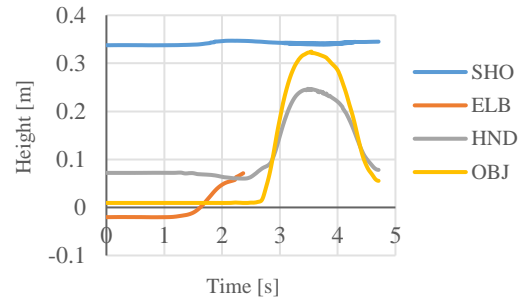


図 A4- 90 S02 健常手/ペン (10/10)

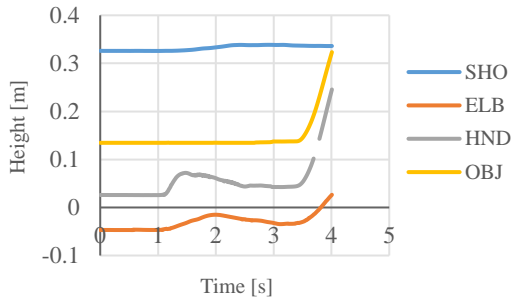


図 A4- 91 S02 提案条件/缶 (1/5)

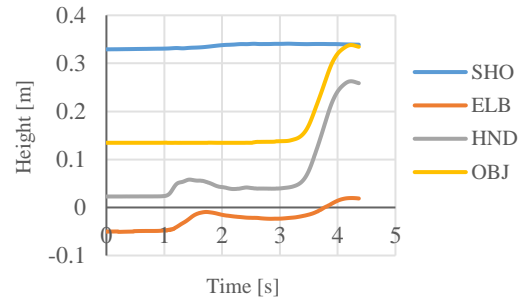


図 A4- 92 S02 提案条件/缶 (2/5)

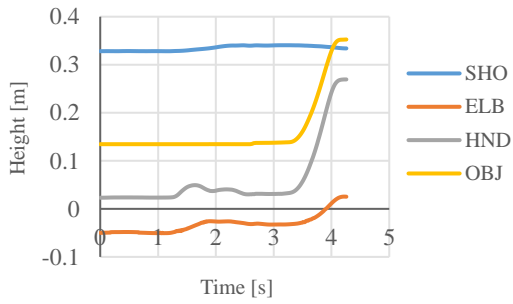


図 A4- 93 S02 提案条件/缶 (3/5)

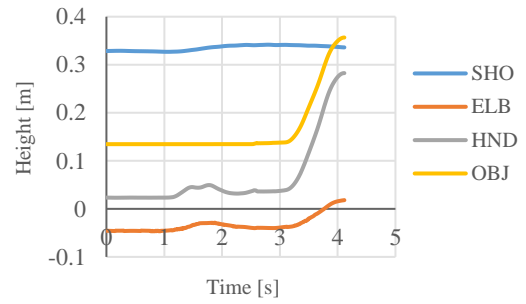


図 A4- 94 S02 提案条件/缶 (4/5)

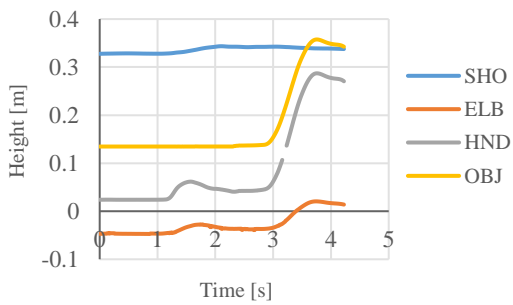


図 A4- 95 S02 提案条件/缶 (5/5)

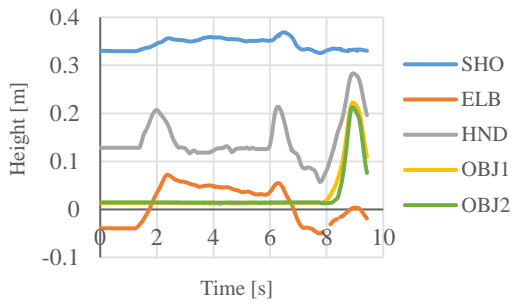


図 A4-96 S02 提案条件/ノート (1/5)

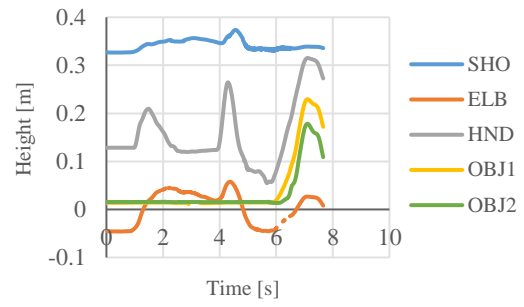


図 A4-97 S02 提案条件/ノート (2/5)

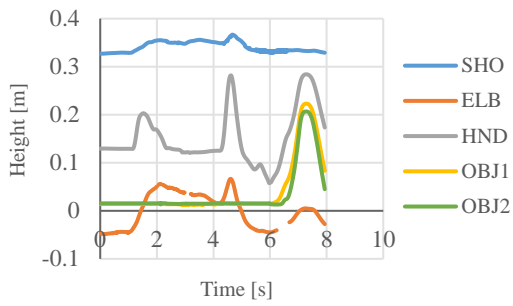


図 A4-98 S02 提案条件/ノート (3/5)

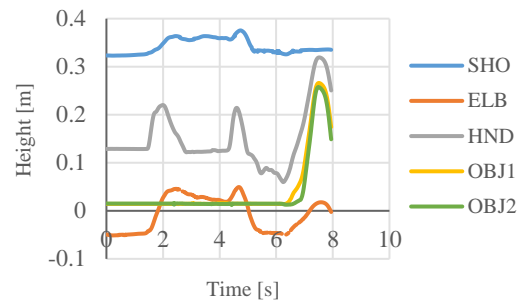


図 A4-99 S02 提案条件/ノート (4/5)

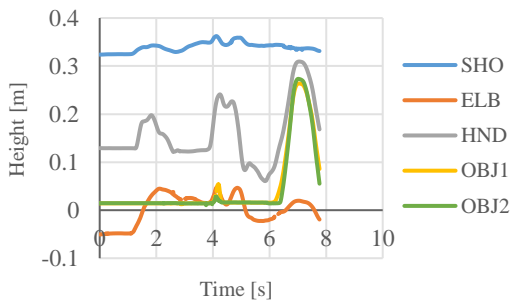


図 A4-100 S02 提案条件/ノート (5/5)

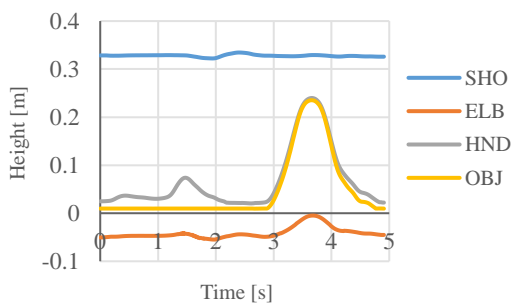


図 A4-101 S02 提案条件/ペン (1/5)

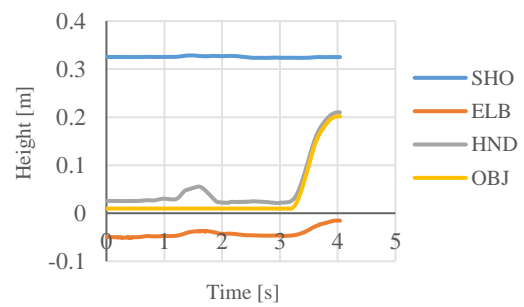


図 A4-102 S02 提案条件/ペン (2/5)

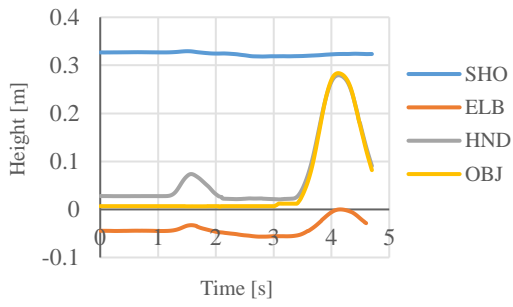


図 A4- 103 S02 提案条件/ペン (3/5)

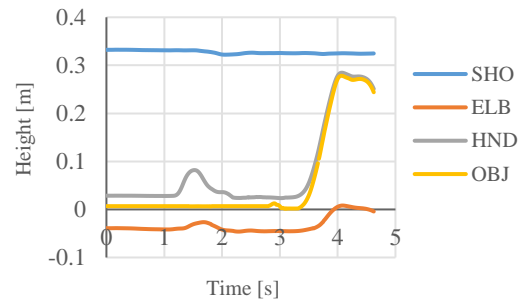


図 A4- 104 S02 提案条件/ペン (4/5)

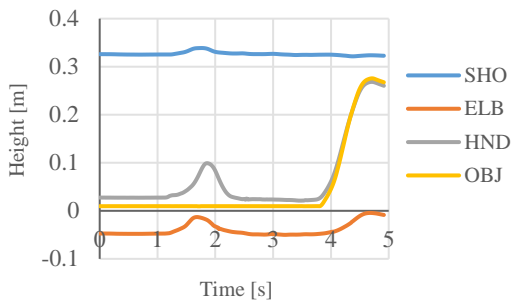


図 A4- 105 S02 提案条件/ペン (5/5)

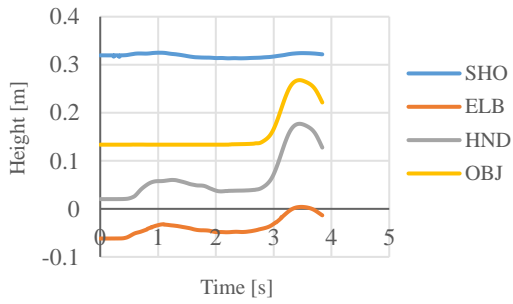


図 A4- 106 S02 既製条件/缶 (1/5)

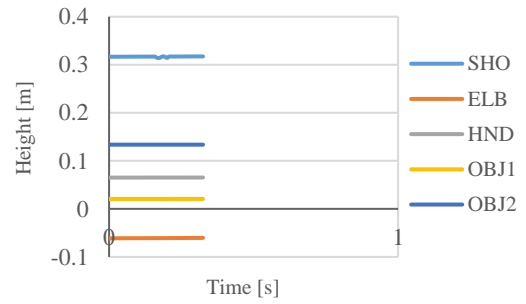


図 A4- 107 S02 既製条件/缶 (2/5)

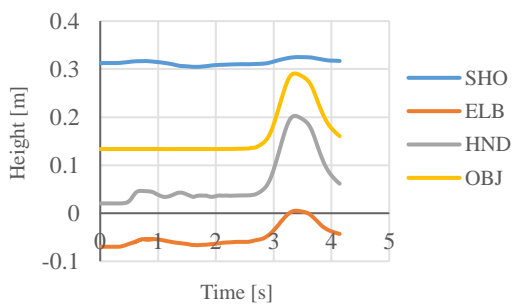


図 A4- 108 S02 既製条件/缶 (3/5)

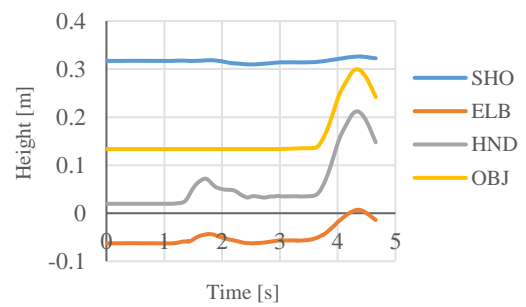


図 A4- 109 S02 既製条件/缶 (4/5)

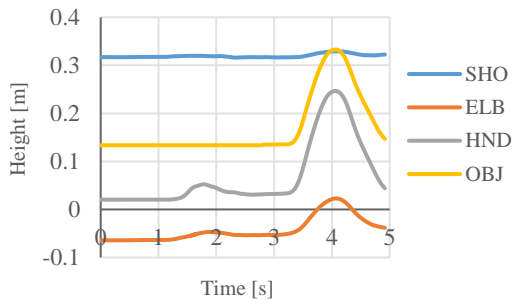


図 A4- 110 S02 既製条件/缶 (5/5)

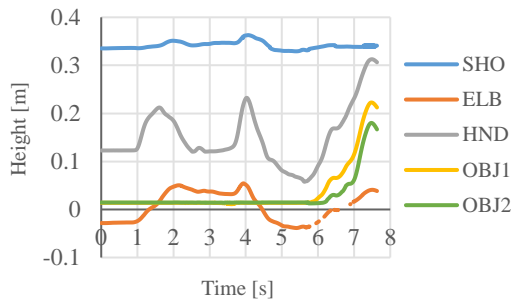


図 A4- 111 S02 既製条件/ノート (1/5)

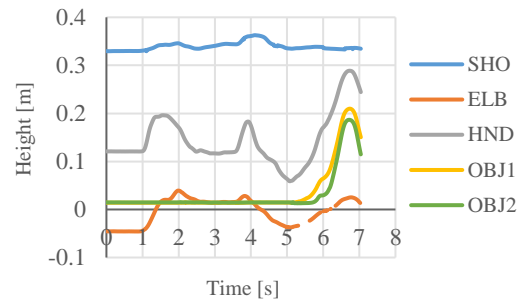


図 A4- 112 S02 既製条件/ノート (2/5)

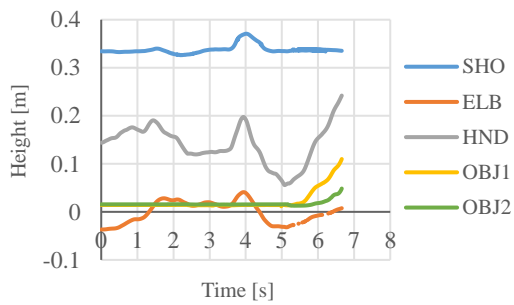


図 A4- 113 S02 既製条件/ノート (3/5)

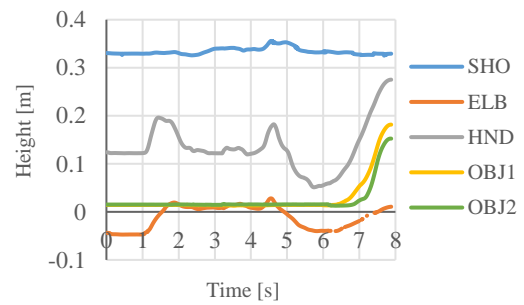


図 A4- 114 S02 既製条件/ノート (4/5)

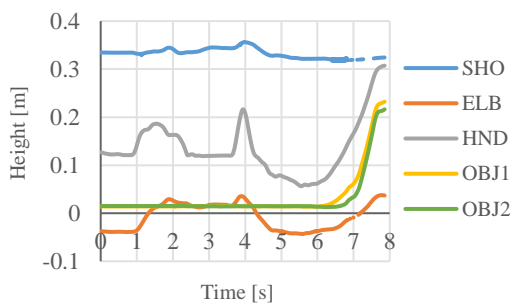


図 A4- 115 S02 既製条件/ノート (5/5)

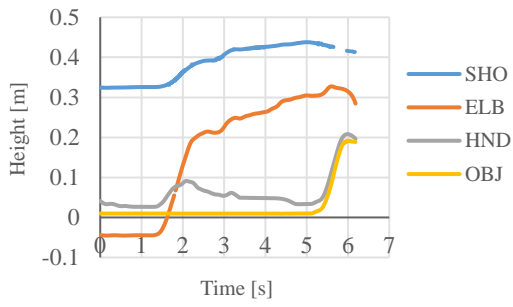


図 A4- 116 S02 既製条件/ペン (1/5)

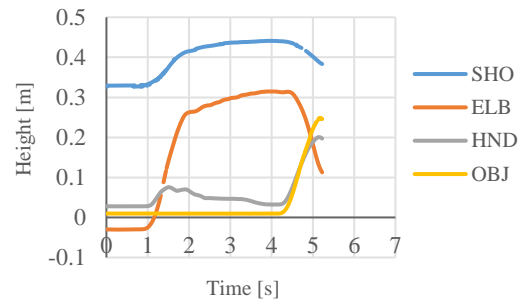


図 A4- 117 S02 既製条件/ペン (2/5)

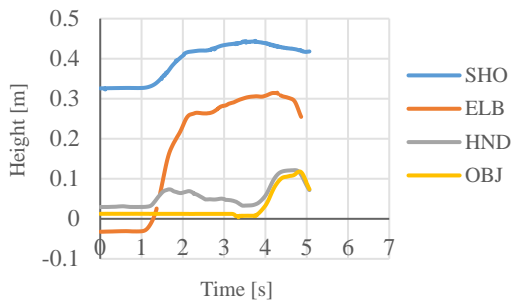


図 A4- 118 S02 既製条件/ペン (3/5)

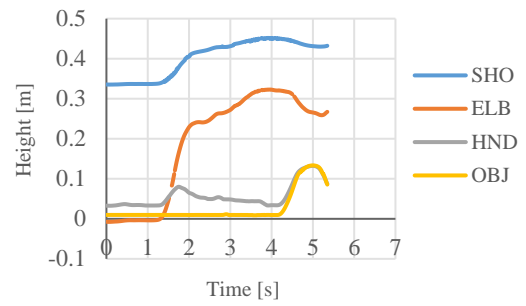


図 A4- 119 S02 既製条件/ペン (4/5)

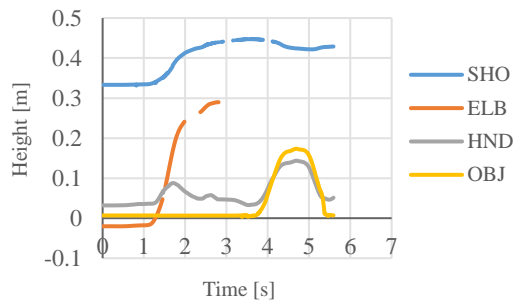


図 A4- 120 S02 既製条件/ペン (5/5)

• S03

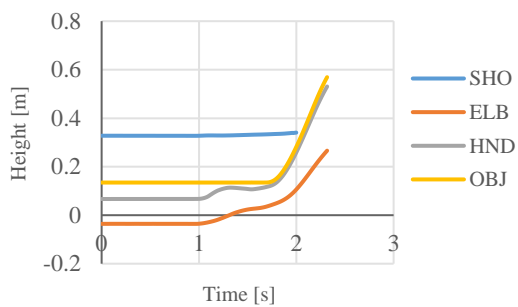


図 A4- 121 S03 健常手/缶 (1/10)

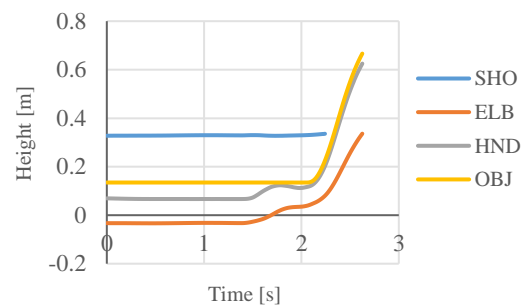


図 A4- 122 S03 健常手/缶 (2/10)



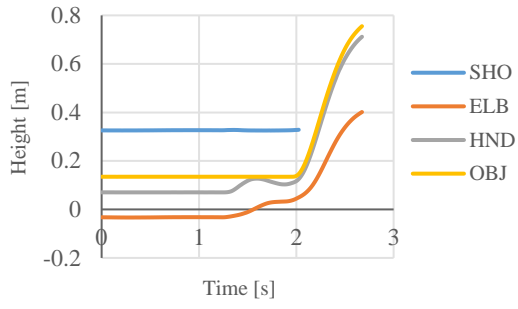


図 A4- 123 S03 健常手/缶 (3/10)

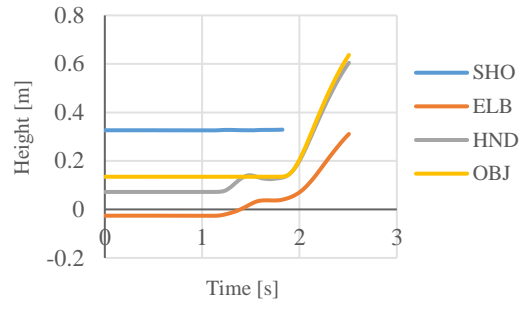


図 A4- 124 S03 健常手/缶 (4/10)

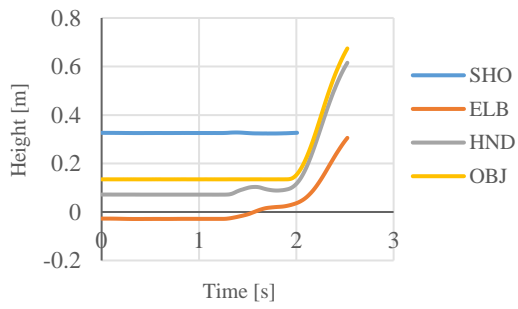


図 A4- 125 S03 健常手/缶 (5/10)

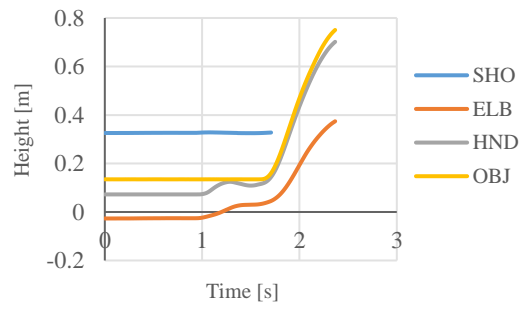


図 A4- 126 S03 健常手/缶 (6/10)

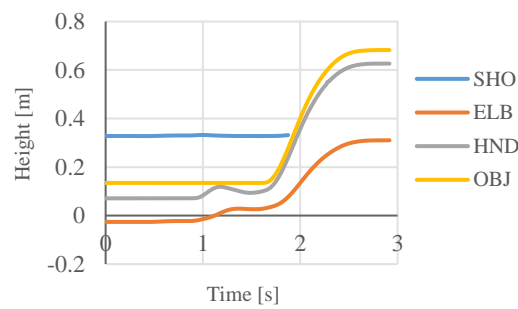


図 A4- 127 S03 健常手/缶 (7/10)

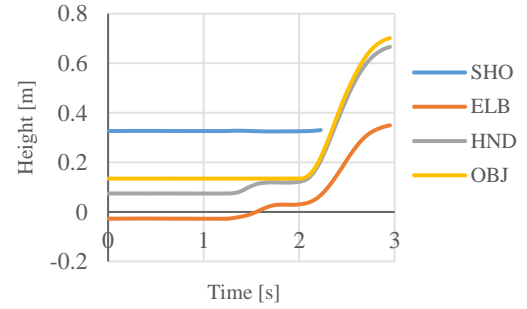


図 A4- 128 S03 健常手/缶 (8/10)

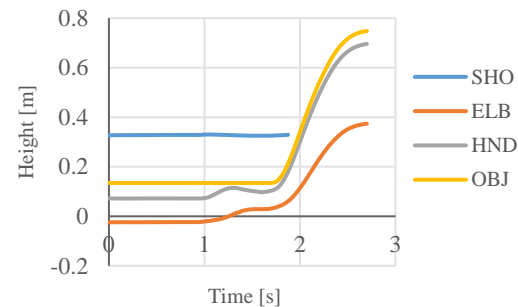


図 A4- 129 S03 健常手/缶 (9/10)

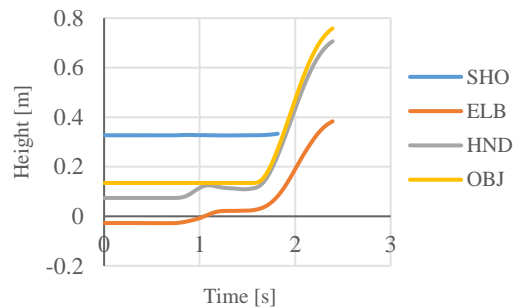


図 A4- 130 S03 健常手/缶 (10/10)

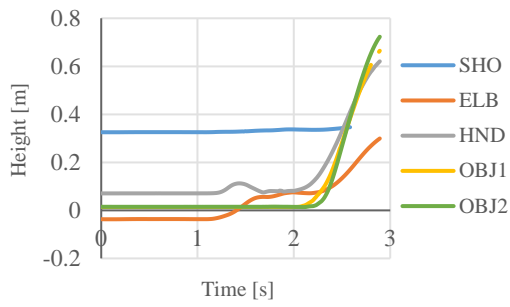


図 A4- 131 S03 健常手/ノート (1/10)

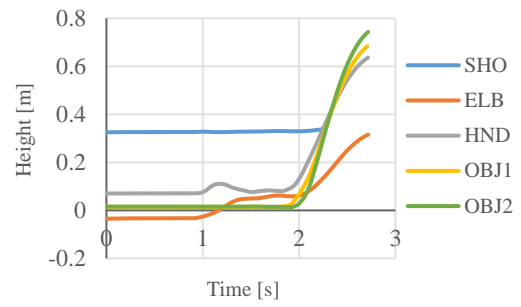


図 A4- 132 S03 健常手/ノート (2/10)

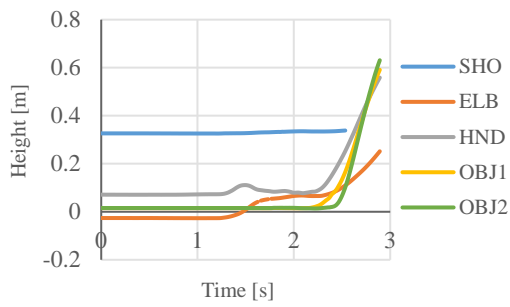


図 A4- 133 S03 健常手/ノート (3/10)

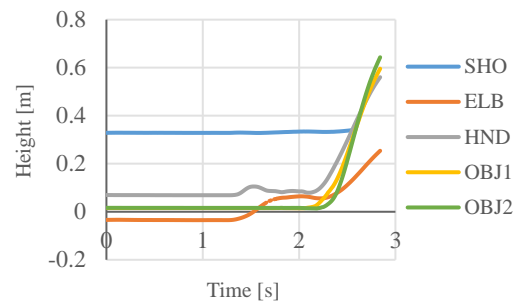


図 A4- 134 S03 健常手/ノート (4/10)

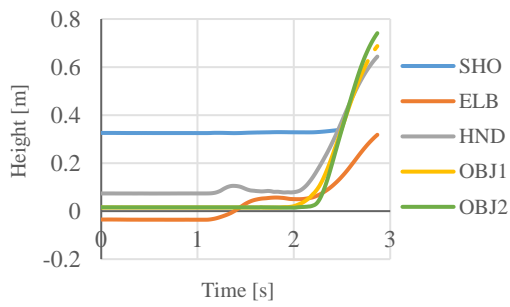


図 A4- 135 S03 健常手/ノート (5/10)

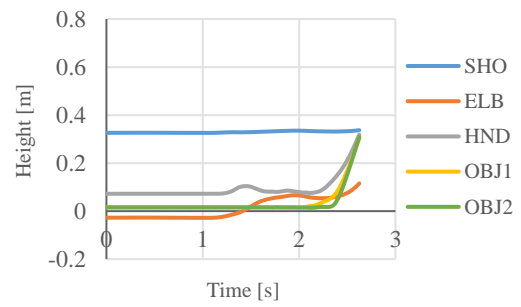


図 A4- 136 S03 健常手/ノート (6/10)

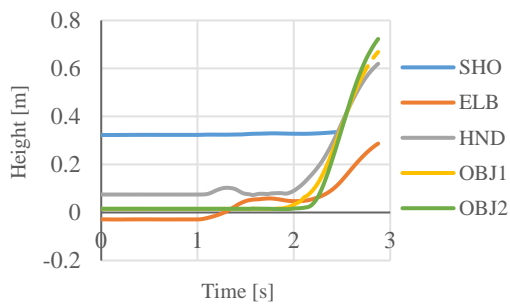


図 A4- 137 S03 健常手/ノート (7/10)

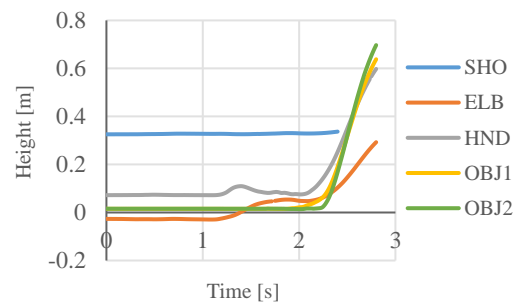


図 A4- 138 S03 健常手/ノート (8/10)

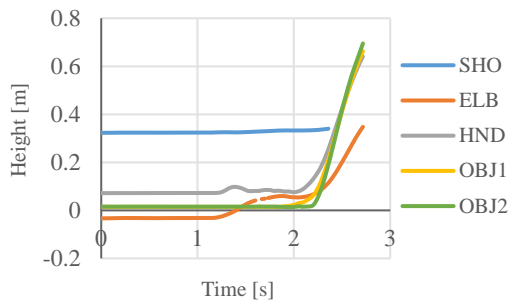


図 A4- 139 S03 健常手/ノート (9/10)

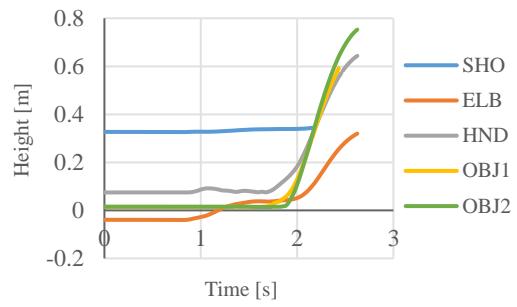


図 A4- 140 S03 健常手/ノート (10/10)

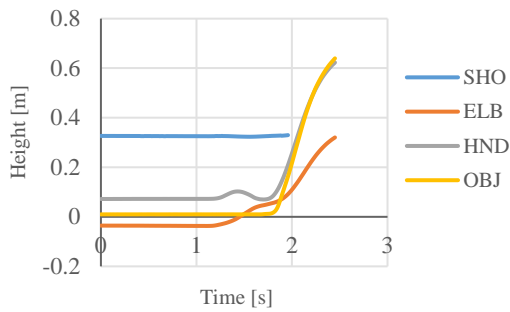


図 A4- 141 S03 健常手/ペン (1/10)

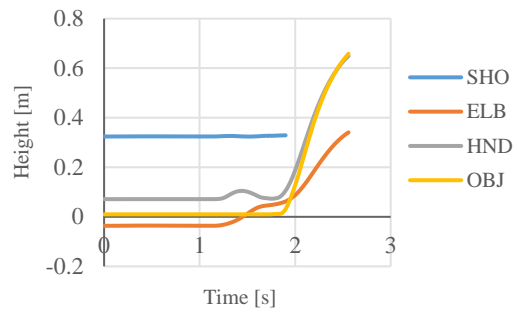


図 A4- 142 S03 健常手/ペン (2/10)

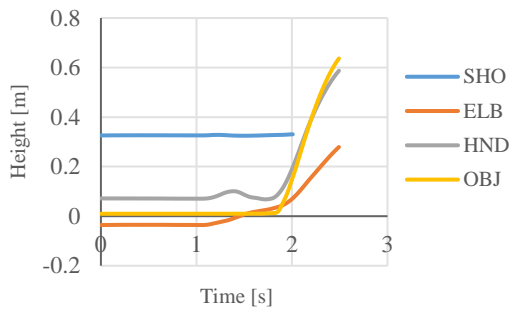


図 A4- 143 S03 健常手/ペン (3/10)

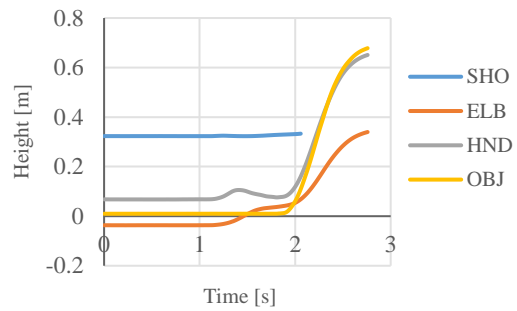


図 A4- 144 S03 健常手/ペン (4/10)

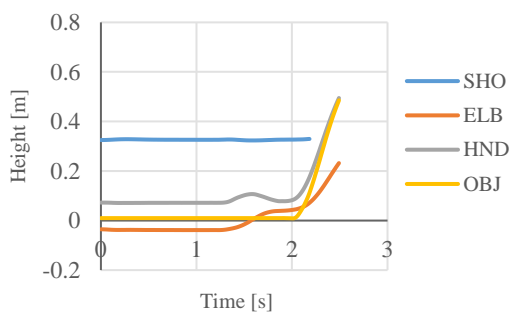


図 A4- 145 S03 健常手/ペン (5/10)

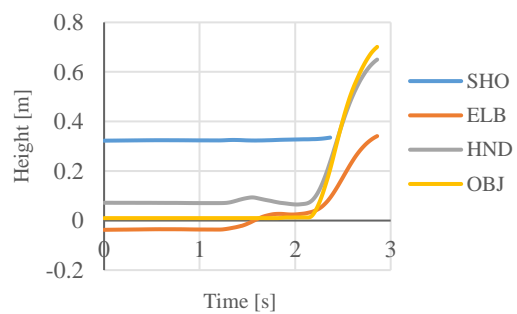


図 A4- 146 S03 健常手/ペン (6/10)

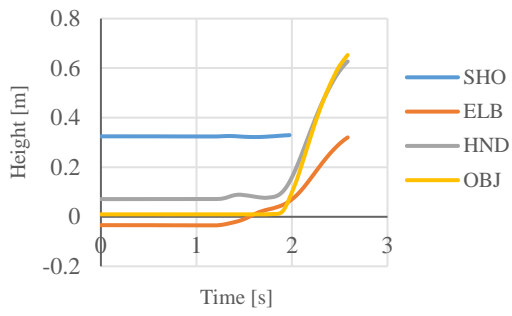


図 A4-147 S03 健常手/ペン (7/10)

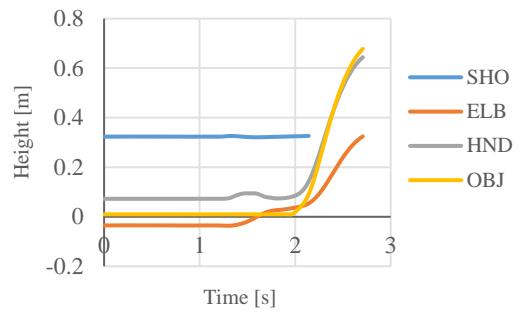


図 A4-148 S03 健常手/ペン (8/10)

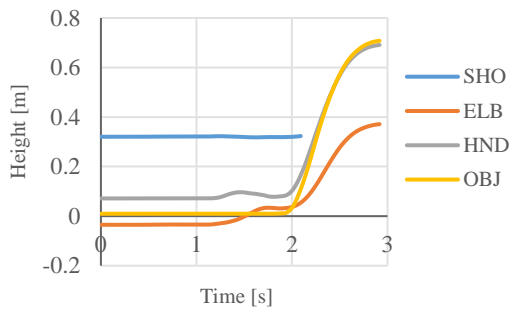


図 A4-149 S03 健常手/ペン (9/10)

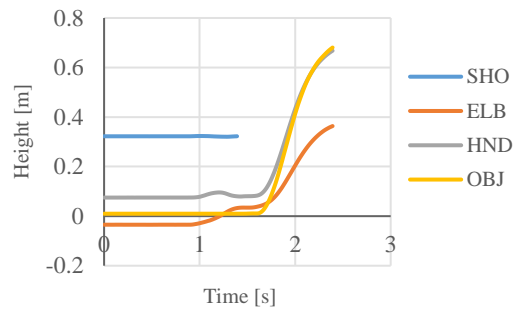


図 A4-150 S03 健常手/ペン (10/10)

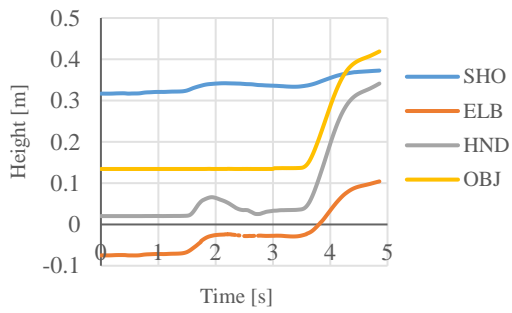


図 A4-151 S03 提案条件/缶 (1/5)

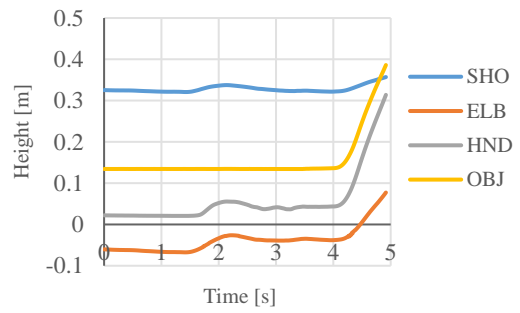


図 A4-152 S03 提案条件/缶 (2/5)

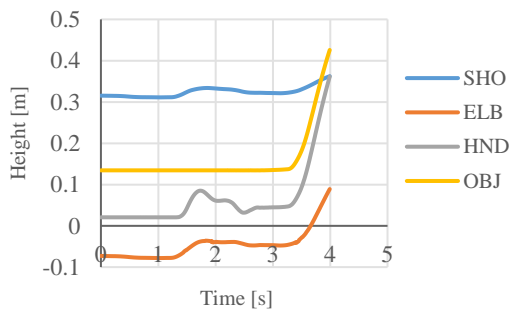


図 A4-153 S03 提案条件/缶 (3/5)

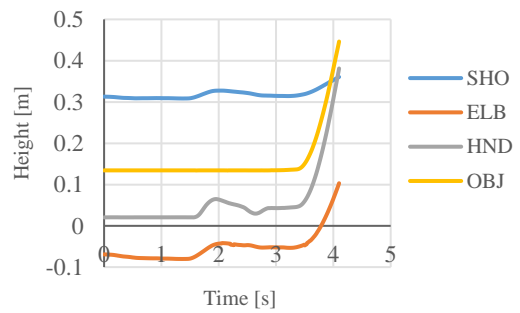


図 A4-154 S03 提案条件/缶 (4/5)

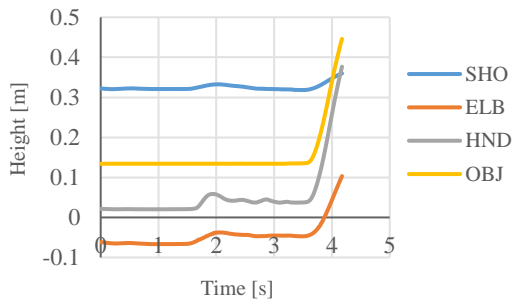


図 A4- 155 S03 提案条件/缶 (5/5)

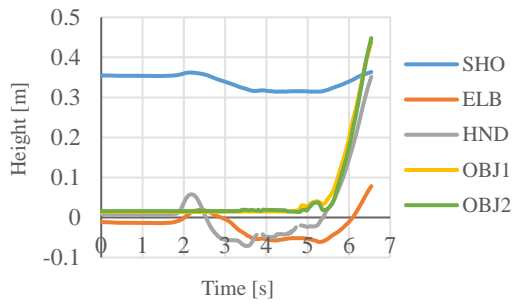


図 A4- 156 S03 提案条件/ノート (1/5)

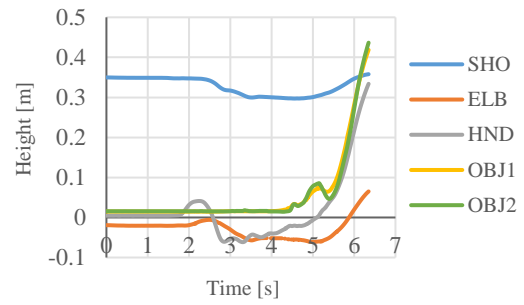


図 A4- 157 S03 提案条件/ノート (2/5)

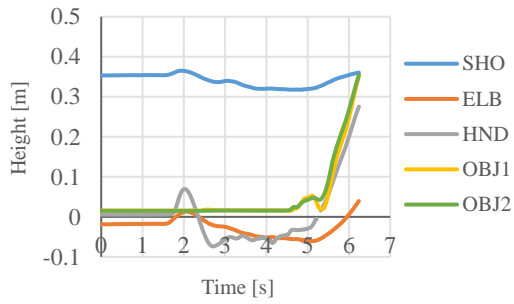


図 A4- 158 S03 提案条件/ノート (3/5)

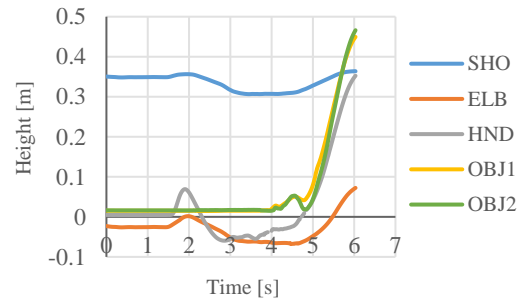


図 A4- 159 S03 提案条件/ノート (4/5)

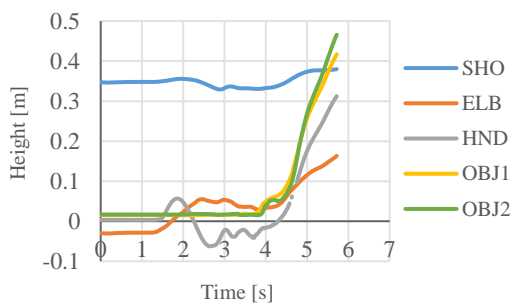


図 A4- 160 S03 提案条件/ノート (5/5)

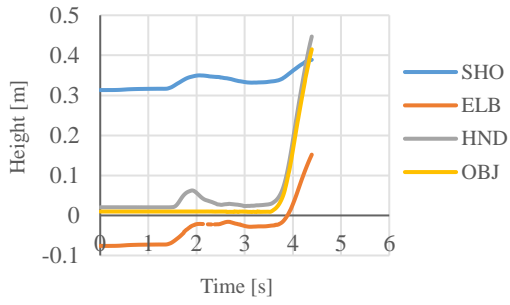


図 A4- 161 S03 提案条件/ペン (1/5)

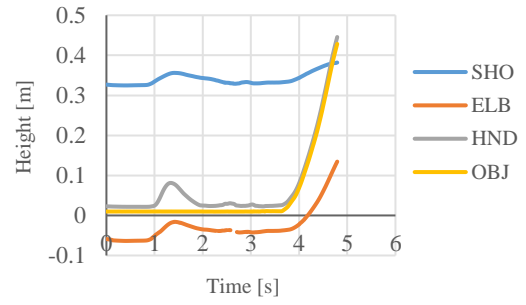


図 A4- 162 S03 提案条件/ペン (2/5)

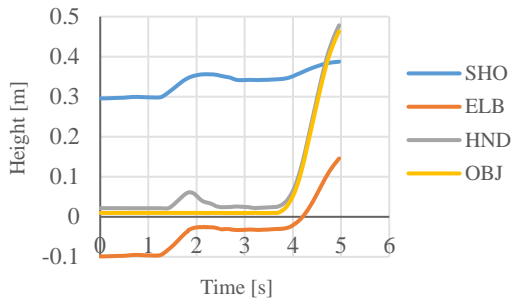


図 A4- 163 S03 提案条件/ペン (3/5)

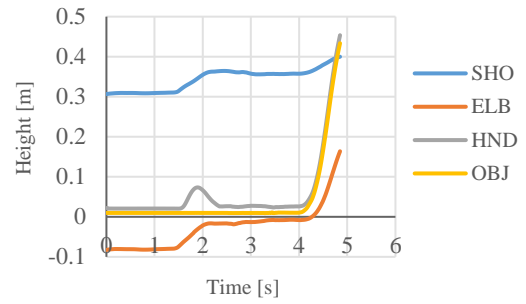


図 A4- 164 S03 提案条件/ペン (4/5)

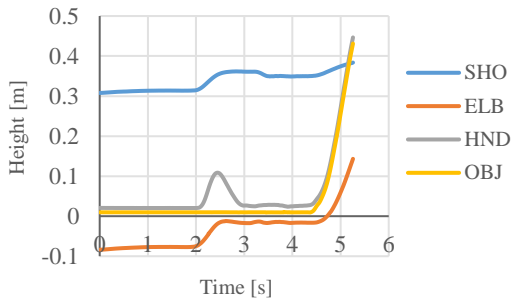


図 A4- 165 S03 提案条件/ペン (5/5)

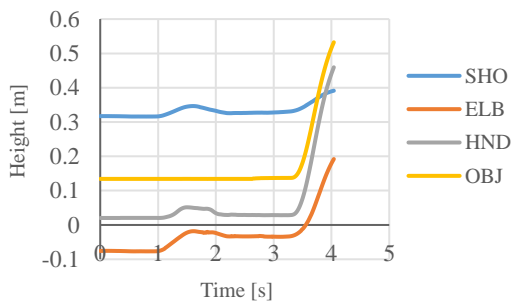


図 A4- 166 S03 既製条件/缶 (1/5)

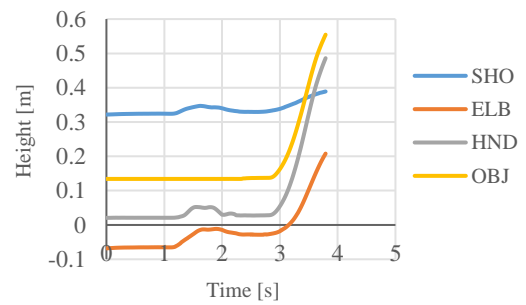


図 A4- 167 S03 既製条件/缶 (2/5)

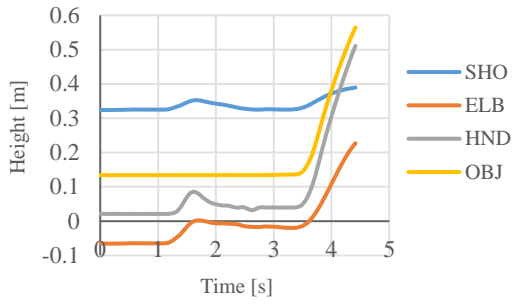


図 A4- 168 S03 既製条件/缶 (3/5)

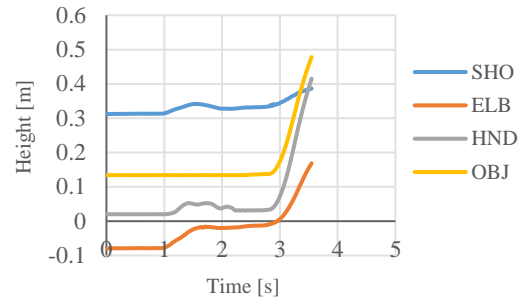


図 A4- 169 S03 既製条件/缶 (4/5)

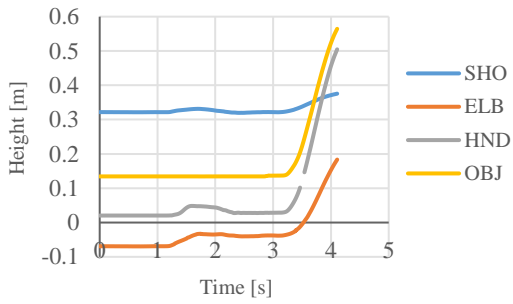


図 A4- 170 S03 既製条件/缶 (5/5)

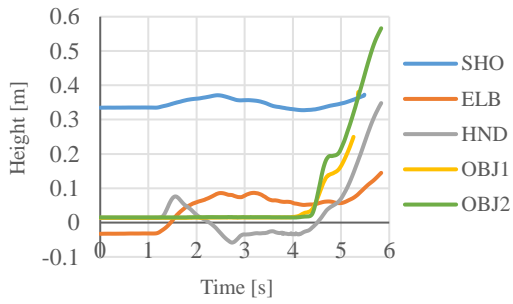


図 A4- 171 S03 既製条件/ノート (1/5)

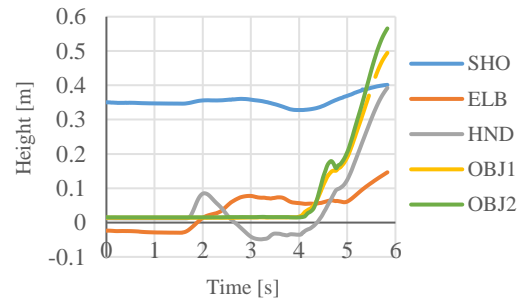


図 A4- 172 S03 既製条件/ノート (2/5)

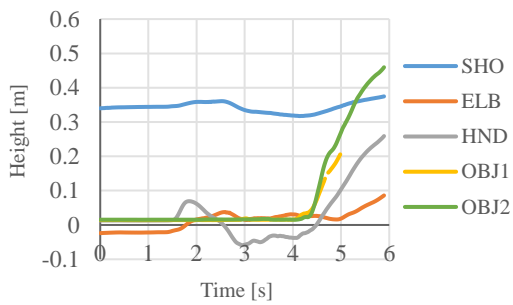


図 A4- 173 S03 既製条件/ノート (3/5)

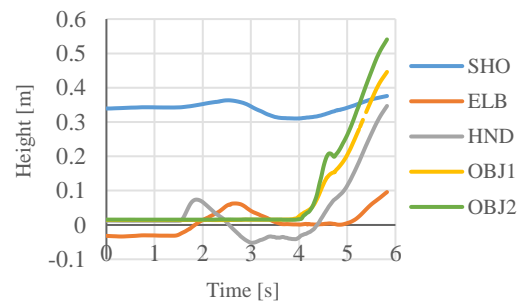


図 A4- 174 S03 既製条件/ノート (4/5)

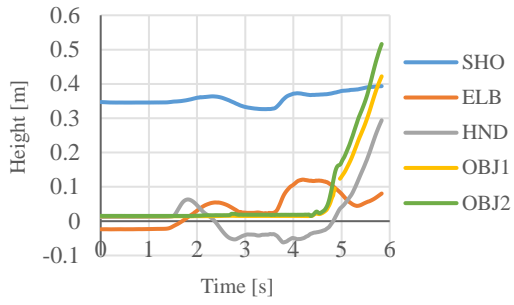


図 A4- 175 S03 既製条件/ノート (5/5)

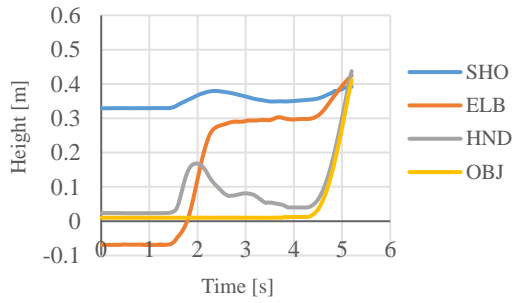


図 A4- 176 S03 既製条件/ペン (1/5)

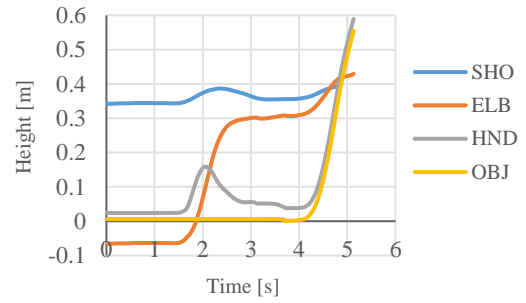


図 A4- 177 S03 既製条件/ペン (2/5)

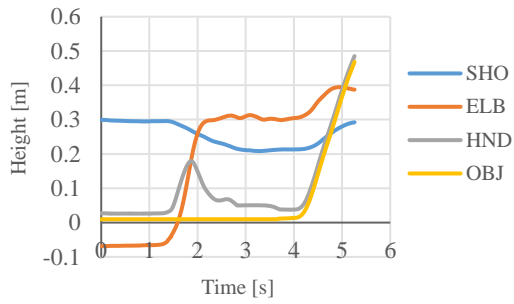


図 A4- 178 S03 既製条件/ペン (3/5)

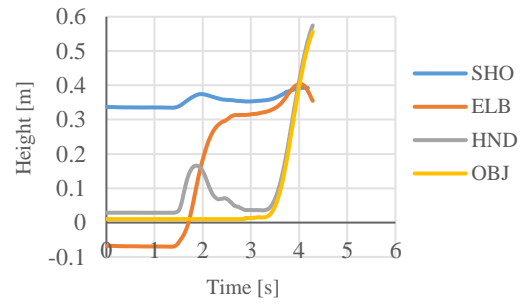


図 A4- 179 S03 既製条件/ペン (4/5)

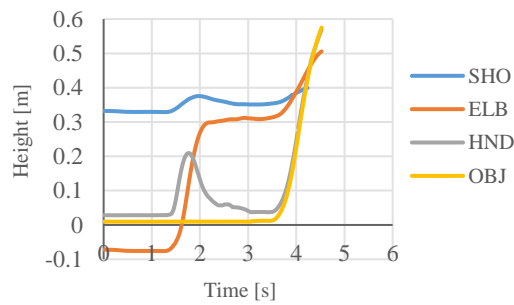


図 A4- 180 S03 既製条件/ペン (5/5)