

複数 RGB-D センサ間での計測相互干渉に関する実験的検討

An Experimental Investigation of Mutual Interaction among RGB-D Sensors

諸根理仁*, 遠藤麻衣*, 遠藤央*, 柿崎隆夫*

Masahito Morone*, Mai Endo*, Mitsuru Endo*, Takao Kakizaki*

*日本大学工学部

*College of Engineering, Nihon University

キーワード： 生活支援 (Life support) 日常生活活動 (ADL)
RGB-D センサ (RGB-D sensor) Kinect センサ (Kinect sensor)

連絡先： 〒 963-8642 福島県郡山市田村町徳定字中河原 1 日本大学 工学部 機械工学科
柿崎・遠藤研究室

諸根理仁, Tel.: (024)956-8784, FAX.: (024)956-8784 E-mail: morone.masahito.ss.lab@gmail.com

1. はじめに

脳血管疾患は日本の介護要因の首位である。特に要介護度 4, 5 の患者の 3 割以上を占める¹⁾ など重度な症状を呈する事も多い。特有の後遺症として片麻痺が挙げられる。

脳血管疾患患者にとって早期の日常生活動作 (ADL: Activities of Daily Living) の実施はリハビリになり早期社会復帰に有効であるとされている²⁾。そのため過度な支援は患者のリハビリの機会を奪い、機能回復を妨げることとなる。

したがって患者の症状に応じた適度な支援が望まれる。しかし患者の症状、状態には個人差があるため、作業療法士 (OT) や理学療法士 (PT) が観察し、オンデマンドに支援する必要があるとされている。一方で日常生活動作に対する OT や PT の観察指導には限界がある。

そこで本研究では支援システム REACH (R-robotic Enhanced Assistant Conquering Handi-

caps) を提案する³⁾。Fig.1 に本システムのコンセプト図を示す。本システムでは支援対象者の症状、状態を推定しオンデマンドに支援する事で早期社会復帰を目指す。

具体的には支援対象者からの要求に基づき支援する際に、移動ロボットは支援対象者の症状、状態を認識する。認識結果に基づき、1) 要求通りの支援の実施、2) 家族や介護士などの支援者への支援内容の伝達、3) 支援対象者自身による実施を促し実施過程を見守ることの中から動作を選択する。

本研究では支援対象者の症状、状態は RGB-D センサを用いた状態推定システムにより認識する。本システムでは RGB-D センサとして Microsoft 社製の Kinect を用いる。支援対象者の日常動作を長期間計測することでブルンストロームステージ (BS: Brunnstrom Stage) を推定し、これに基づき状態を推定する。

これまでに 1 台の Kinect を用いて支援対象者

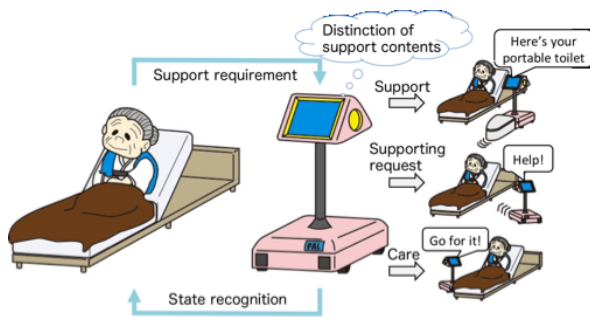


Fig. 1 支援システム REACH のコンセプト .
Concept of a proposed system.

の関節位置 / 角度を算出し BS 判定方法の 1 つである上田法⁴⁾ (上田の 12 段階片麻痺回復グレード法) の上肢機能テストの複数項目について自動判定に成功した⁵⁾ .

しかし、一部の機能テストについては 1 台の Kinect を用いた計測ではセンサオクルージョンが発生し関節位置 / 角度の算出が困難であった .

そこで本研究では複数台の Kinect を用いて計測する事で、オクルージョンを回避する . ここで複数台同時計測時においては、各 Kinect が発する赤外線が干渉することで、距離の計測精度が悪化する事が報告されている⁶⁾ .

これに対し Kinect に振動を加えることでノイズを低減出来るとの研究がある⁶⁾ . 一方で、センサオクルージョンを回避するためには互いに角度をつけて配置する必要がある、この場合の振動と計測精度の関係については報告されていない . したがって本稿では、2 台の Kinect 同士的位置関係および振動と計測精度の関係について報告する .

2. RGB-D センサを用いた状態推定システム

Fig.2 に提案する片麻痺者の状態推定システムのコンセプト図を示す . 本システムでは Kinect を用いて支援対象者の動作を非接触かつマーカレスで計測することで、身体に低負担な症状お

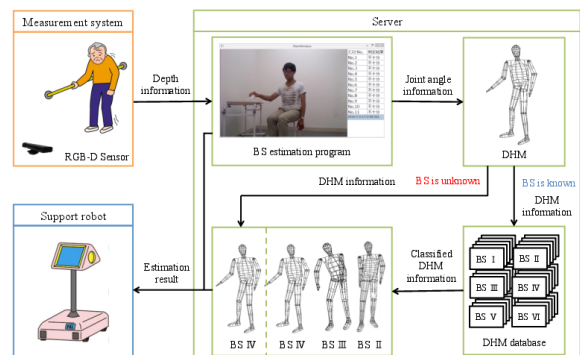


Fig. 2 状態推定システムのコンセプト .
concept of a state estimation system.

よび状態推定の実現を目指す . 本システムは複数の Kinect およびライフサポートリアリティサーバで構成される .

Kinect では支援対象者を撮影し、RGB 画像と各ピクセルにおけるセンサからの距離が得られる . この情報をサーバへと送り、距離情報に基づき人体各部を識別し、20 関節の 3 次元位置を推定する事でワイヤフレーム人間モデル (WFHM: Wire Frame Human Model) を得る . 次に WFHM の動作を逆運動学により解析することで、関節角度情報を得る .

解析により得られた関節角度情報や関節位置情報を用いて、以下の 2 通りの手法により支援対象者の BS を判定する . 1 つ目は上田らにより提案された 12 段階片麻痺回復グレード法 (上田法) に基づき判定する手法である . 上田法は複数の機能テストを実施し、テストの可否に基づき BS を判定する方法である . 本システムでは ADL の計測および解析により得られた情報を用いて各機能テストの可否を判定し、それらを統合することで BS を自動判定する . 2 つ目は、関節角度情報に基づき支援対象者の動作を実現するデジタル人間モデル (DHM: Digital Human Model) を生成し、生成した DHM と前もってデータベースに保存しておいた BS 別 DHM の特徴点を比較し BS を推定する方法である . 上記の方法により BS が既知となった場合、以降に生成した DHM を BS 別にデータベースに分

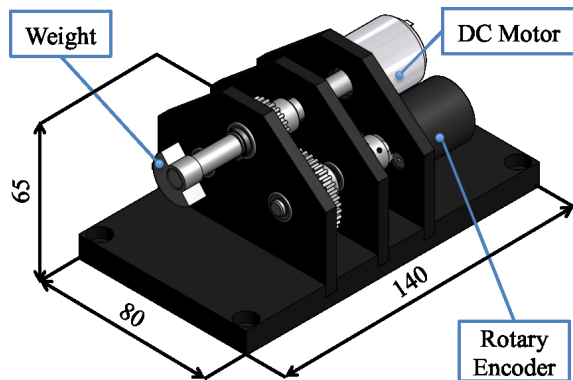


Fig. 3 加振機の構造の概略図 . Schematic Structure of a Vibrator.

類保存し，以後の BS 推定に利用する．

このようにして得られた BS 推定結果を支援対象者にフィードバックしリハビリなどに活用する他，推定結果に基づき移動ロボットの支援内容を決定することでオンデマンドな支援を実現する．

3. 計測相互干渉の低減手法

複数台の Kinect を用いた距離計測における問題として赤外線干渉がある．各 Kinect の照射する赤外線の点群は波長およびパターンが同一であるため，照射範囲が重なると自らが照射した点群の判別が困難となる．これにより距離画像における距離情報の欠落した点（ホール）や計測精度の低下が生じる．

この問題に対し Andrew らは，ホールは周囲の平面と連続であるとの仮定により，距離情報を補完することで対応している⁷⁾．本手法はホールの数が少なく密集していない場合においては有効であるが，ホールの数が多く密集している場合には適用できない．

また Kai らは複数の Kinect に切り欠きのある回転盤を装着することで，ある時刻において 1 台の Kinect 以外の赤外線を遮断し干渉を回避している⁸⁾．しかし本手法では，同時刻において距離を計測可能な Kinect は 1 台であり，台数

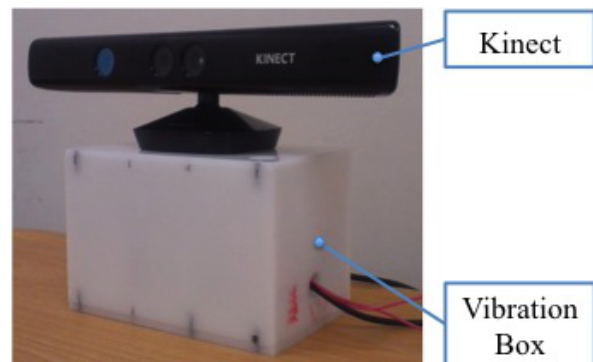


Fig. 4 振動箱上面に取り付けた Kinect . A Kinect on a Vibration Box.

の増加にはフレームレートを落とすことで対応する必要がある．よって高速で動く物体の計測には不向きであり，数台での計測にしか対応できない．

一方で Alex , Andrew らは Kinect への加振により干渉を回避している⁶⁾⁹⁾．加振された Kinect で撮影する画像上では，他の Kinect が照射した点群はぼやけて映り，自身の照射した点群は鮮明に映るため，干渉の影響を受けない．本手法では台数が多い場合においても，各 Kinect ごとに振動の方向や大きさを設定することで容易に干渉を回避できる．また，フレームレートを落とさずに同時に計測可能であるなど利点が多い．

したがって本研究では，Alex らの提案した Kinect へ加振する手法を用いることとした．

4. Kinect への加振手法

Fig.3 に今回試作した Kinect 用加振機の概略を示す．加振機の寸法は $140 \times 80 \times 65$ [mm] である．加振機には重りが装着された軸（振動軸）があり，この軸が回転することで不釣合いが発生して振動する．不釣合いは振動軸の回転速度と重りを変えることで調節可能である．振動軸は DC モータ（Portescap 社製 26N58-216E）の回転を歯車により伝達することで回転する．モータの回転数をモータドライバ IC（東芝製 TA7291P）と Arduino Uno を用いて PWM 制御すること

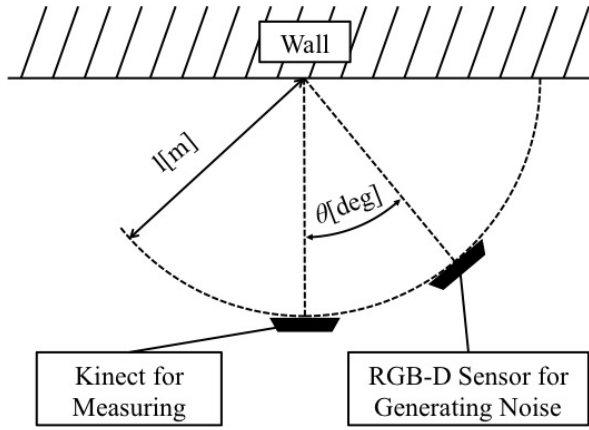


Fig. 5 実験装置の配置図 . Layout drawing of the experimental equipment.

で，振動の周波数を制御する．振動軸の回転数はロータリーエンコーダ（OMRON 社製 E6A2-CW3C）と Arduino Uno を用いて計測する．

この加振機を $155 \times 95 \times 105$ [mm] の箱の内部に取り付けて振動箱とする．振動箱の上面に Kinect を設置することで加振機の振動を Kinect へと伝達する．Fig.4 に振動箱上面に Kinect を固定した様子を示す．

5. 実験および考察

5.1 実験目的

複数台の Kinect を用いた計測における赤外線干渉による距離の計測精度の低下が小さい設置方法の検討を目的とする．そのため実験により Kinect 同士の位置関係および振動条件が距離の計測精度に及ぼす影響を調べた．

5.2 実験装置および実験方法

本実験では 2 台の Kinect を用いた．この内の 1 台は距離計測用 Kinect であり，これは計測用コンピュータ（Microsoft 社製 Surface Pro）に接続する．もう 1 台の Kinect は赤外線干渉を発生させるための攪乱用 Kinect である．攪乱用 Kinect は Fig.4 に示すように振動箱の上面

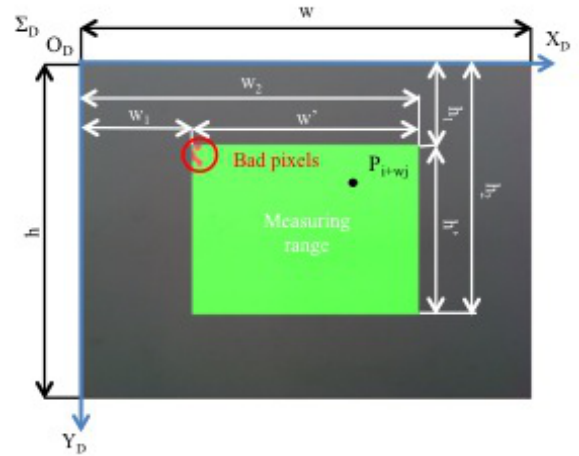


Fig. 6 距離画像の計測範囲 . Measuring range of depth Pictures.

に取り付けて攪乱用コンピュータ（SONY 社製 VAIO）に接続する．

Fig.5 に実験方法の概略図を示す．計測用 Kinect は壁に対して並行をなすように壁からの距離が l [m] の位置に配置する．また攪乱用 Kinect は，壁から計測用 Kinect への垂線となす角度が θ [deg] で距離が l [m] の位置に配置する．そして加振機の周波数を f_v [Hz] に設定し，計測用 Kinect で壁までの距離を計測する．なお，本実験では $l=1$ [m] とし，2 台の Kinect は地面から同じ高さに配置した．

Fig.6 に本実験における距離画像の計測範囲を示す．Fig.6 中の画像座標系 Σ_D において横軸は X_D 軸，縦軸は Y_D 軸である．また，距離画像の計測範囲の上限は X_D 軸方向に w [px]， Y_D 軸方向に h [px] であり，原点からこの範囲内に存在するピクセル P_{i+wj} の距離情報 z_{i+wj} が得られる．ここで i, j はそれぞれ X_D 軸方向の位置 [px]， Y_D 軸方向の位置 [px] であり，以下を満たす．

$$\{i|1, 2, \dots, w\} \quad (1)$$

$$\{j|1, 2, \dots, h\} \quad (2)$$

本実験では 1 度の計測につき F フレーム分， $w_1 \leq i \leq w_2$ かつ $h_1 \leq j \leq h_2$ を満たす範囲

(計測範囲)のノイズの数,全ピクセルの平均距離および標準偏差を算出する.ここで w_1, w_2, h_1 および h_2 はそれぞれ X_D, Y_D 軸方向の計測範囲の下限および上限である.また(3)式を満たすピクセルをノイズと定義する.

$$\varepsilon < |l - z_i| \quad (3)$$

ここで ε は計測距離の許容誤差であり, n 番目のフレームにおけるノイズ数を $N_n[\text{px}]$ とする.

n 番目のフレームにおける平均距離 \bar{z}_n は計測範囲中のピクセル P_{i+w_j} の距離 z_{i+w_j} の総和をピクセルの総数で除することにより算出した.

$$\bar{z}_n = \frac{1}{w'h'} \sum_{i=w_1}^{w_2} \sum_{j=h_1}^{h_2} z_{i+w_j} \quad (4)$$

(4)式において $w' = w_2 - w_1, h' = h_2 - h_1$ である.

また, n 番目のフレームにおける標準偏差 σ_n は下式により算出した.

$$\sigma_n = \sqrt{\frac{\sum_{i=w_1}^{w_2} \sum_{j=h_1}^{h_2} (\bar{z} - z_{i+w_j})^2}{w'h'}} \quad (5)$$

$$(6)$$

そして F フレーム分の N_n, \bar{z}_n と σ_n の平均値 $\bar{N}, \bar{z}, \bar{\sigma}$ を下式により算出する.

$$\bar{N} = \frac{1}{F} \sum_{n=1}^F N_n \quad (7)$$

$$\bar{z} = \frac{1}{F} \sum_{n=1}^F \bar{z}_n \quad (8)$$

$$\bar{\sigma} = \frac{1}{F} \sum_{n=1}^F \sigma_n \quad (9)$$

ここで本実験において $w=640[\text{px}], h=480[\text{px}]$ であり, $w_1=160[\text{px}], w_2=480[\text{px}], h_1=120[\text{px}], h_2=360[\text{px}]$ である.また $\varepsilon=50[\text{mm}], F=300$ である.

以上の計測を $=20,40,60,80[\text{deg}]$ の各配置において周波数 fv を $fv=0,30,50,70,90[\text{Hz}]$ と変化させながら3回ずつ行った.

5.3 実験結果および考察

Table 1に攪乱用Kinectの設置角度および加振機の周波数 fv ごとのノイズ数 $\bar{N}[\text{px}]$,各ピクセルの平均距離 $\bar{z}[\text{mm}]$ と計測距離の標準偏差 $\bar{\sigma}[\text{mm}]$ を示す.これらは3回の計測の平均値である.

Fig.7に攪乱用Kinectの設置/振動条件とノイズ数の関係を示す.Fig.7より70[Hz]の場合を除き,同じ周波数においては攪乱用Kinectの設置角度が80,20,60,40[deg]の順にノイズが少ないことが分かる.

$=20[\text{deg}]$ の場合は fv の増加に伴いノイズ数 \bar{N} が減少しており, $fv=70[\text{Hz}]$ または90[Hz]の時に消滅した.また $=40[\text{deg}]$ の場合は $0 \leq fv \leq 50[\text{Hz}]$ の区間においてノイズ数が増加し, $fv=70[\text{Hz}]$ の時に最小となり, $fv=90[\text{Hz}]$ でまた増加した. $=60[\text{deg}]$ の場合も $0 \leq fv \leq 50[\text{Hz}]$ の区間においてノイズ数が増加し,それ以降は減少し, $fv=90[\text{Hz}]$ の時にノイズが消滅した. $=80[\text{deg}]$ の場合は全周波数においてノイズが発生してない.また, $=40[\text{deg}]$ の場合を除き, $fv=90[\text{Hz}]$ の場合ノイズが消滅した.

Fig.8には攪乱用Kinectの設置/振動条件と各ピクセルの平均距離の関係を示す.Fig.8より,周波数 fv によらず,各設置角度において平均距離はほぼ一定であることが分かる.

他方, Fig.9に攪乱用Kinectの設置/振動条件と計測距離の標準偏差の関係を示す.Fig.7とFig.9の比較により,攪乱用Kinectの設置/振動条件と計測距離の標準偏差の間には,ノイズ数と同様の傾向があると分かる. $fv=70[\text{Hz}]$ の場合以外では同じ周波数では $=80,20,60,40[\text{deg}]$ の順に標準偏差が小さく,計測精度が良い.

$=20[\text{deg}]$ の場合は fv の増加に伴い標準偏差が減少しており, $fv=70[\text{Hz}]$ または90[Hz]の時に5[mm]程度となった. $=40[\text{deg}]$ の場合は $0 \leq fv \leq 50[\text{Hz}]$ の区間において標準偏差が増加し, $fv=70[\text{Hz}]$ の時に最小となり, $fv=90[\text{Hz}]$ でまた増加した. $=60[\text{deg}]$ の場合も $0 \leq fv \leq$

Table 1 実験結果 . Experimental result.

Angle θ [deg]	Frequency f_v [Hz]	Bad Pixels \bar{N} [px]	Ave. Distance \bar{Z} [mm]	Std. Dev. σ [mm]
20	0	64.33	972.99	28.59
	30	42.67	973.15	22.76
	50	36.33	973.01	21.04
	70	0.00	973.99	5.13
	90	0.00	973.96	5.26
40	0	215.67	970.50	51.86
	30	246.33	970.15	55.01
	50	271.33	969.93	57.89
	70	11.00	973.13	11.75
	90	71.67	972.55	26.83
60	0	103.00	973.68	35.67
	30	118.33	973.32	38.40
	50	150.00	972.93	43.25
	70	45.33	974.11	23.91
	90	0.00	975.00	5.69
80	0	0.00	989.00	5.06
	30	0.00	989.00	5.06
	50	0.00	989.00	5.06
	70	0.00	989.00	5.03
	90	0.00	989.00	5.03

50[Hz] の区間において標準偏差が増加し，それ以降は減少し， $f_v=90$ [Hz] の時に $\sigma=5.69$ [mm] となった． $\theta=80$ [deg] の場合は全周波数において $\sigma=5$ [mm] 程度であった．

以上より複数台同時計測において距離の計測精度を向上させるためには，まず配置の工夫によりノイズの発生を低減し，ノイズが残った場合には Kinect を 70[Hz] 以上の周波数で加振すべきだと考えられる．

6. おわりに

複数台の Kinect を用いた計測においては，各 Kinect が照射する赤外線が干渉することで距離の計測精度が悪化することが知られている．対策としては Kinect を振動させることが有効であるとされているが，各 Kinect の位置関係と計測精度の関係についての報告は少ない．そのため本稿では，2 台の Kinect 同士の位置関係および振動と距離の計測精度の関係について実験的に考察した．実験により，Kinect に 70[Hz] 以上の周波数で振動を加えることでノイズの発生を低減し，距離画像の計測精度を向上できると分

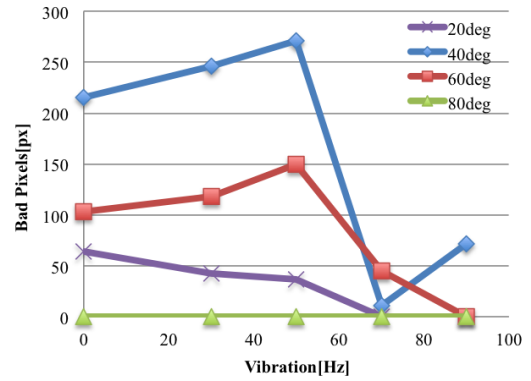


Fig. 7 設置角度および周波数とノイズ数の関係 . Relationship between angle, frequency and number of bad pixels.

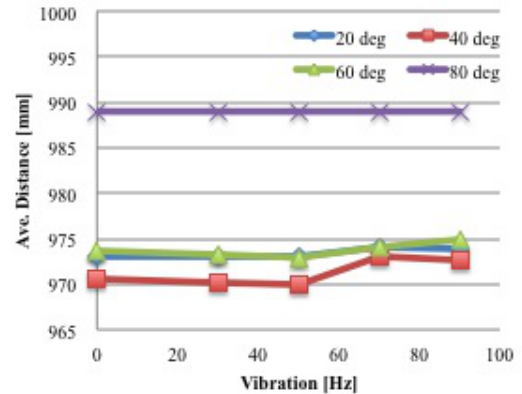


Fig. 8 設置角度および周波数と計測距離の平均値の関係 . Relationship between angle, frequency and Average distance.

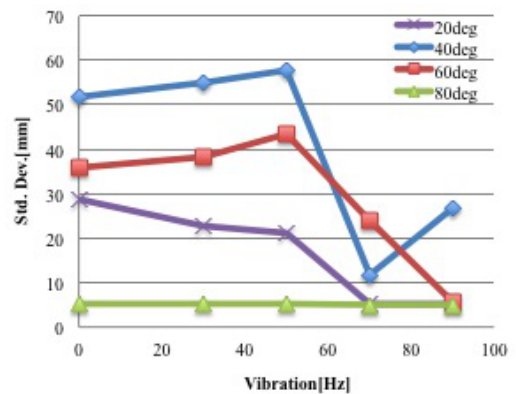


Fig. 9 設置角度および周波数と標準偏差の関係 . Relationship between angle, frequency and standard deviation.

かった。また、Kinect の設置角度によって距離の計測精度が大きく異なることが明らかになった。以上より、計測精度の向上には、ノイズが発生しないように Kinect を配置し、必要に応じて 70[Hz] 以上で加振すると効果的だと分かった。

今後は Kinect の台数が 3 台以上の場合においてノイズが発生しにくい配置を検討していく。その後、複数台の Kinect を用いた障害者の状態推定システムを実装していく。

参考文献

- 1) 厚生労働省: 平成 25 年度国民生活基礎調査の概況, <http://goo.gl/owFZfd>, (参照日: 2014/11/27)
- 2) 上田敏, 他: 日常生活を再考する - 「できる ADL」, 「している ADL」から「する ADL」へ -, リハビリテーション医学, 30-8, 539/549(1993)
- 3) 遠藤麻衣, 長谷川幸美, 遠藤央, 柿崎隆夫: 要介護者を支援するライフサポートシステム REACH に関する研究 - 音声インタフェースによる簡易トイレの搬送支援実験 -, 第 19 回ロボティクスシンポジウム, 3C2, 263/268(2014)
- 4) 岩崎テル子 (編): 作業療法評価学, 342/344, 医学書院 (2011)
- 5) 諸根理仁, 遠藤麻衣, 遠藤央, 柿崎隆夫: RGB-D センサを用いた片麻痺者のブルンストロームステージの自動判定, LIFE2014, GS9-3(2014)
- 6) Alex Butler, et al.: Shake'n'Sense: Reducing Interference for Overlapping Structured Light Depth Cameras, CHI2012, (2012)
- 7) Andrew Maimone, Henry Fuchs: Encubrance-Free Telepresence System with Real-Time 3D Capture and Display using Commodity Depth Cameras, IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality, (2011)
- 8) Kai Berger, et al.: Markerless Motion Capture using multiple Color-Depth Sensors, Vision, Modeling and Visualization (VMV), (2011)
- 9) Andrew Maimone, Henry Fuchs: Reducing Interference Between Multiple Structured Light Depth Sensors Using Motion, IEEE Virtual Reality, (2012)