原 著

# 3次元体表面スキャナー使用時における被写体色の光吸収と室内照明の干渉の影響についての検討

*Exploring the Significance of Subject Color Absorption and Indoor Lighting Interference in Three-Dimensional Surface Scanner Applications*

鈴木 秀和[1)]，齋藤 正英[2)]，上田 幸治[3)]，小出 智生[3)]，佐野 尚樹[4)]，相川 良人[4)]，大西 洋[5)]

1）修士（放射線学）　山梨大学医学部附属病院　放射線技術部
2）（医学物理士）博士（医科学）　山梨大学医学部　放射線医学講座
3）山梨大学医学部附属病院　放射線技術部
4）博士（医科学）　山梨大学医学部附属病院　放射線技術部
5）（医師）博士（医学）　山梨大学医学部　放射線医学講座

**Key words:** SGRT, Radiation Therapy, 3D surface scanner, Ambient light factor

【Abstract】
There is a three-dimensional surface scanner that utilizes the reflection of red laser light as a device for surface-guided radiation therapy. However, depending on the color of the object, sufficient reflected light might not be obtained, and accurate surface recognition could be hindered by the contamination of ambient light similar to the reflected light, originating from indoor illumination. Therefore, this system aimed to elucidate how the recognition capability is affected by the color of the target object and the ambient light.

Various hues, grayscale variations, and skin colors were employed to investigate whether recognition could be achieved by altering the color temperature and illuminance of the surrounding light. It was found that recognition was not possible for colors that absorb red laser light, such as blue, green, black, and darker colors with insufficient reflection. Furthermore, while the impact of ambient illuminance was substantial, the influence of color temperature was minimal.

**【要 旨】**
体表面画像誘導放射線治療用デバイスとして，赤色レーザーの反射を用いた3次元体表面スキャナーがある．しかし，対象物の色によっては十分な反射光が得られないことや，反射光と同様の光が室内照明から混入することにより，正確な体表面認識が行えないことがあった．そこで本システムにおいて，対象物の色相や周囲光によって認識能がどのように変化するかを明らかにした．各色相やグレースケール，スキンカラーを用いて，周囲光の色温度・照度を変化させて認識できるかを確認した．赤色レーザーを吸収する青や緑，黒や十分反射が得られない暗い色では認識ができなかった．また周囲光照度による影響は大きいが色温度の影響は少ない結果となった．



## 1．緒　言

放射線治療において，照射位置の照合は非常に重要であり，高精度放射線治療においては必須の技術である[1)]．その中で，画像誘導放射線治療（Image-guided radiotherapy；IGRT）には，Electronic portal imaging devices（以下，EPID）を使用して治療用エックス線を用いて得た2次元画像であるリニアックグラフィー（Linac graphy；LG）を用いる2D-2Dマッチング法，kVエックス線を用いてコーンビームコンピューター断層撮影（Cone beam computed tomography；CBCT）によって3次元的に位置照合をする3Dマッチング法，また前立腺などについては，経直腸的に超音波プローブを用いて位置照合をする方法[2)]がある．しかし，いずれも放射線を使用するなどの患者への侵襲的な行為によって行われている．

しかし，昨今においては，対象物へ外部より光を照射し，そこから得られる情報を解析することによって対象物表面の3次元的な位置情報を取得する技術がIGRTに利用され，体表面画像誘導放射線治療（Surface guided radiation therapy；SGRT）として用いられるようになった．SGRTにおける体表面認識の方法は主に3次元スキャナーの技術であり，放射線治療で利用される方法としては，三角形などの決まった形状パターンを被写体へ投影し，その変形を光

SUZUKI Hidekazu, MSc.[1)],
SAITO Masahide, Ph.D.[2)], UEDA Koji, RTT.[3)],
KOIDE Tomoki, RTT.[3)], SANO Naoki, Ph.D.[4)],
AIKAWA Yoshihito, Ph.D.[4)], ONISHI Hiroshi, Ph.D.[5)]

1) Department of Radiology, University of Yamanashi Hospital
2) Medical Physicist, Department of Radiology, University of Yamanashi
3) Department of Radiology, University of Yamanashi Hospital
4) Department of Radiology, University of Yamanashi Hospital
5) Doctor, Department of Radiology, University of Yamanashi

Received May 17, 2023; accepted September 4, 2023

学カメラで撮影取得，解析して立体形状の認識や変化を測定するパターン光投影方式型の放射線治療装置用シンクロナイザー[3]と，単色レーザー光を被写体へ照射し，その光の反射光を収集・解析する三角法方式型のもの[4]がある．

このうちレーザー光を用いた方法は，対象物へ単色のレーザー光を連続的に広範囲に照射し，その対象物からの反射光を経時的に収集・解析することによって，立体像を経時的変化として表示することが可能なものである．しかし，単色レーザーを用いるため，反射光の収集において照射したレーザー光以外の室内照明から混入した光が，収集データへ影響を及ぼす可能性がある．また対象物の色相によって，照射するレーザー光の反射に影響を与えることが考えられた．しかし，この影響について報告された例はない．

そこで本研究では，非接触レーザー光を用いた3次元体表面スキャナー（VOXELAN® HEV-600M/RMS, Electronics Research & Development Corporation, Okayama, Japan. 以下，VOXELAN）が治療室内環境および，対象物の色相が収集される体表面位置データへ及ぼす影響について明らかにすることを目的とした．

## 2. 方 法

### 2-1 使用機器

本研究で用いたVOXELANは，レーザー光の照射口2カ所と反射光の撮像カメラ部1カ所を備えた本体を天井よりつり下げ，赤色レーザーをアイソセンター付近へ照射できるように設置してある（Fig.1）．アイソセンターまでの距離は1.6 m，俯角（ふかく）は45度となっている．本システムは，連続的に赤色レーザーを照射・データ収集することによって，経時的な立体変化をプロファイルで表示することが可能である．

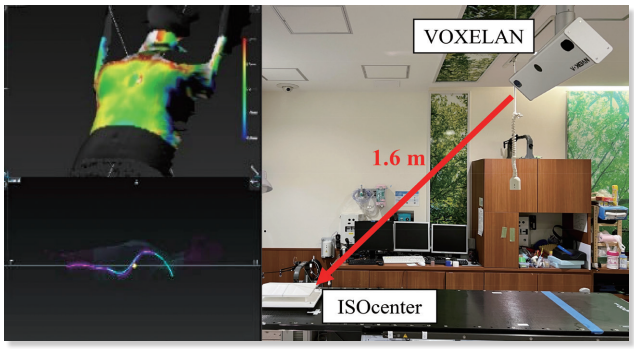


Fig.1 Overview of VOXELAN.

VOXELAN can grasp the three-dimensional shape by irradiating the object with a red laser (two places on the left and right) from the ceiling suspended main body and continuously shooting the reflected light with the camera (center part) of the main unit. The position displacement amount with the reference data can be displayed in a color map (upper left figure) or in a profile (lower left figure).

### 2-2 対象物（被写体または患者）の色相・明度の違いによる認識能

対象物として，RGBカラーコードを基に，24色（Fig.2）の色相について，また白（#FFFFFF）から黒（#000000）までを51階調に分類し，そのうち25階調（Fig.3）を明度として，さらに皮膚の色の影響を考慮

| Number | C1 | C2 | C3 | C4 | C5 | C6 | C7 | C8 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Color | | | | | | | | |
| RGB code | #F20C0C | #F2460C | #F27F0C | #F2B80C | #F2F20C | #B8F20C | #7FF20C | #46F20C |
| Number | C9 | C10 | C11 | C12 | C13 | C14 | C15 | C16 |
| Color | | | | | | | | |
| RGB code | #0CF20C | #0CF246 | #0CF27F | #0CF2B8 | #0CF2F2 | #0CB8F2 | #0C7FF2 | #0C46F2 |
| Number | C17 | C18 | C19 | C20 | C21 | C22 | C23 | C24 |
| Color | | | | | | | | |
| RGB code | #0C0CF2 | #460CF2 | #7F0CF2 | #B80CF2 | #F20CF2 | #F20CB8 | #F20C7F | #F20C46 |

Fig.2 24-Color RGB Color Code for hue evaluation.

| Number | (G0) | G40 | G45 | G50 | G55 | G60 | G65 | G70 | G75 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Color | | | | | | | | | |
| RGB code | (#000000) | #282828 | #2D2D2D | #323232 | #373737 | #3C3C3C | #414141 | #464646 | #4B4B4B |
| Number | G80 | G85 | G90 | G95 | G100 | G105 | G110 | G115 | G120 |
| Color | | | | | | | | | |
| RGB code | #505050 | #555555 | #5A5A5A | #5F5F5F | #646464 | #696969 | #6E6E6E | #737373 | #787878 |
| Number | G125 | G130 | G135 | G140 | G145 | G150 | G155 | G160 | (G255) |
| Color | | | | | | | | | |
| RGB code | #7D7D7D | #828282 | #878787 | #8C8C8C | #919191 | #969696 | #9B9B9B | #A0A0A0 | (#FFFFFF) |

Fig.3 25 Grayscale Codes for color brightness evaluation (including white and black additions).

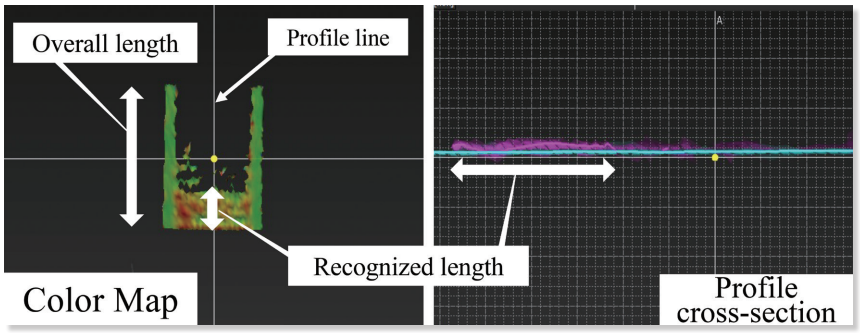


Fig.4　How to find the recognition rate.

The recognition rate was measured using the VOXELAN profile function. The blue line in the right figure indicates the reference position, while the red line indicates the position of the recognized object.

するため，皮膚色を36色に分類したVon Luschan's chromatic scale[5]によるスキンチャートから，色の濃いNo.25からNo.35までの11色についてカラープリンター（ColorMultiWriter 9100C：NEC, Tokyo, Japan）を用いて色紙試料を作成し，それらを用いて認識能を測定した．

VOXELANは，天井に取り付けられた本体から45度の俯角でレーザー光を照射して対象物までの距離を測定し，三角測量法を用いて立体を認識する．そのため水平な寝台の上にある均一にレーザーを反射する対象物であっても，対象物が大きいなどアイソセンターから離れた遠方位置に対象点がある場合は，対象点から検出器までの距離が離れるため，反射して検出器へ届く光量がわずかに変わり，認識能に変化が見られる．この現象を利用し，対象物となる色紙の全長が，本研究で用いた3次元体表面スキャナーの機能であるプロファイル表示から認識している長さを測定し，式1を用いて認識率を求めた（Fig.4）．

$$認識率\ (\text{Recognition rate})\ [\%] = \frac{認識した長さ[\text{cm}]}{対象物の全長[\text{cm}]} \times 100[\%] \quad \cdots\cdots（式1）$$

### 2-3　周囲光照度の違いによる認識能の違い

VOXELANは，対象物へ照射した赤色レーザーの反射光を基に距離を計測し，立体形状を経時的に計測する．放射線治療室では患者の位置合わせにおいて，室内レーザーを用いたセットアップや，患者の羞恥心に配慮して照明を暗くすることがある．そのため周囲の明るさがVOXELANの認識能に影響することが考えられた．

周囲の明るさを照度計（LightSpectrum Pro Ver. 4.3.0, iPhone14.3：AM Power Software, Italy）を用い，アイソセンター面で色温度ごとに照度をTable 1のように変化させて，方法2-2で用いたグレースケール25階調について，式1を用いて認識率を求めた．

### 2-4　周囲光色温度の違いによる認識能の違い

VOXELANは赤色レーザーの反射光を撮影するため，本体から照射した赤色レーザー以外の赤色光が入射した場合の影響について，周囲光の色成分について色温度を変化させてその影響を検討した．

周囲光の色温度は，スマートLED電球（SwitchBot, Shenzhen, China）を用いて，アイソセンター面で照度ごとに色温度をTable 2のように変化させて認識率を式1より求めた．また分光放射照度計スペクトルメーター（LightSpectrum Pro

Table 1　Combination table for investigating the impact of differences in illuminance on recognition accuracy.

| Color temperature | Illuminance 1 | Illuminance 2 | Illuminance 3 | Illuminance 4 |
|---|---|---|---|---|
| 2800 K | | 728 lx | 1478 lx | 4158 lx |
| 3600 K | 34 lx | 931 lx | 1290 lx | 4317 lx |
| 5600 K | | 695 lx | 1787 lx | 4639 lx |

Table 2　Combination table for investigating the impact of differences in color temperature on recognition accuracy.

| Illuminance | Color temperature 1 | Color temperature 2 | Color temperature 3 |
|---|---|---|---|
| 700 lx | 2876 K | 3356 K | 5643 K |
| 1700 lx | 2752 K | 3481 K | 5559 K |
| 4200 lx | 2745 K | 3639 K | 5730 K |

Ver.4.3.0，iPhone14.3：AM Power Software）を用いてアイソセンター面での色温度の成分についても測定した．

## 3. 結 果

### 3-1 対象物（被写体または患者）の色相・明度の違いによる影響

色相の違いについては，赤色（C1），黄色（C5），桃色（C21）で100%の認識率であった．しかし，緑色（C8）や紫色（C18）は80%の認識率であり，濃い緑色（C9）や水色（C13），青色（C16）は認識ができなかった（Fig.5）．

またグレースケールによる明度については，十分明度の高い白色は100%の認識能を示し，明度の低い黒色では認識ができなかった．Fig.7，Fig.8からも明度による影響は周囲光照度に影響を受けるが，Fig.3のグレースケールナンバーでG120からG60が認識の境界となった．

皮膚色については，Von Luschan's chromatic scaleのNo.28が閾値で，それ以上の濃い皮膚では認識ができなかった．Von Luschan's chromatic scale No.28は，Fitzpatrick Skin TypeではType Vに当たる（Fig.6）．

### 3-2 周囲光照度の影響

周囲光色温度3600 Kで照度が34 lxの場合，No. G140から認識率が低下しNo. G95で認識ができな

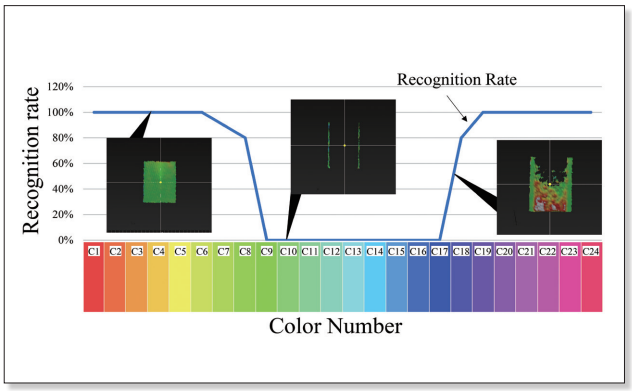


Fig.5 Differences in recognition due to differences in hue.

It could not be recognized by the hues of C9 to C17.

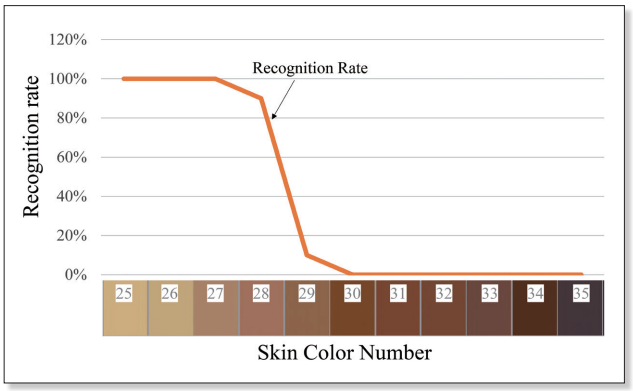


Fig.6 Differences in recognition due to differences in skin color.

Colors darker than skin color number 29 are not recognized.

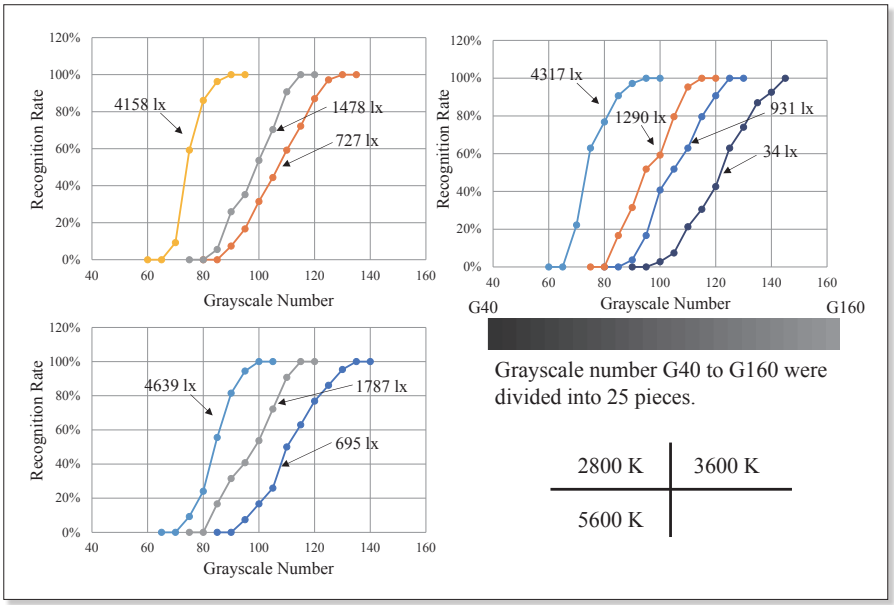


Fig.7 The effect of differences in illuminance due to variations in the color temperature of ambient light on recognition rates.

くなった．また周囲光照度が高くなるに従い，認識できる明度は低くなり，4317 lxではNo. G65が認識限界であった．さらに周囲光色温度を2800 Kや5600 Kでも同様に，周囲光照度が高くなるに従い，認識できる明度は低くなる結果となった（Fig.7）．

### 3-3　周囲光色温度の影響

周囲光照度を一定にして，色温度のみを変えた場合，照度が変わっても認識率に変化はなく，ほぼ同様の閾値であった（Fig.8）．

しかし，色温度が低い場合（2700 K），対象物の辺縁に基準より高い位置を表す表示が見られた．これは，その部位の検出器に入る光量が多くなっていることを示している（Fig.9）．

## 4. 考　察

### 4-1　色相と明度の影響

VOXELANは，天井に設置された本体から赤色レーザーを対象物に照射し，その反射を本体のカメラで撮影し対象物を認識している．よって赤色レーザーが反射されない対象物を認識することはできない．人が色を認識するためには，対象物に当たったさまざまな色の光が吸収・反射を起こすが，そのうち反射した光の色成分が目に届くと，その光の色を対象物の色として認識することとなる．赤色の光を吸収する色，つまり赤色の補色である緑色・青色・藍色の対象物については認識ができない．

また色の明度について本研究では，白から黒の明度スケールを用いた．白色は全ての色の光を反射し，黒

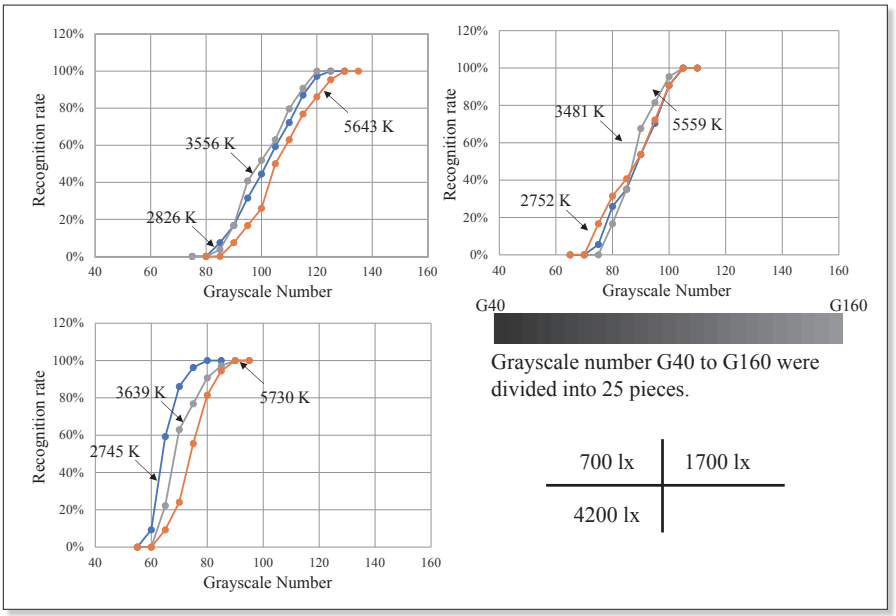


Fig.8　The effect of color temperature differences due to variations in ambient light irradiance on recognition rates.

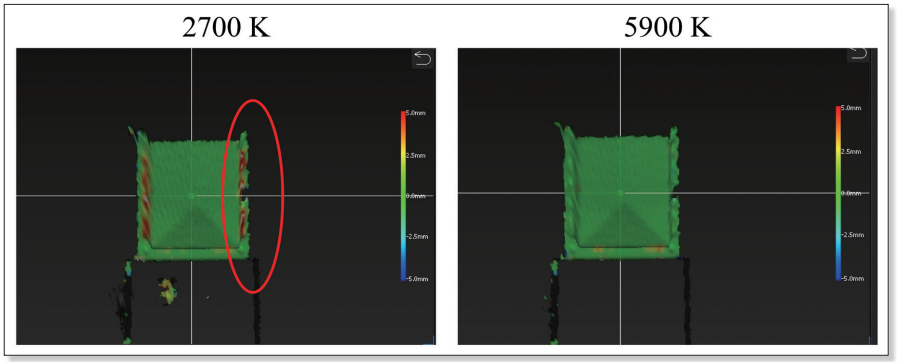


Fig.9　An example of how the color temperature of ambient light affected recognition.
Differences in ambient light color temperature caused image distortion at the edges of the reference object. The red areas on the image indicate higher values compared to the reference position.

色は全ての色の光を吸収する．つまり白色は認識できるが，黒色は認識できないことになる．さらに白と黒の中間色については，その明度によって赤色の光が吸収され，反射される光の量が変わることにより，結果3-1のように，ある明度によってVOXELANが認識する閾値が存在した．ただ，対象物と検出器との距離が離れることによって反射光の量は減少し，認識する閾値も低下すると思われる．さらに皮膚色については，色相と明度の組み合わせに連続性がないため数値化できる閾値の決定は困難である．しかし，皮膚色のパターンについては，Von Luschan's chromatic scaleやFitzpatrick Skin Typeが一般的に用いられていることからも，本研究においてもこれらのパターンから80%以上の認識ができる境界としての閾値を示せた．

SGRTは乳癌に対する照射でその効果を発揮している[4]が，照射の経過に伴い皮膚の変色による認識能の低下が懸念された．しかし，本研究で認識できる皮膚色の閾値を把握できたことで，全乳房照射など皮膚表面の経時的な皮膚変色を来す症例においては，変色の程度をVon Luschan's chromatic scaleやFitzpatrick Skin Typeの色見本と比較することで，SGRT継続可否の可能性を事前に把握することが可能となり，また国際化している医療現場においては肌色の異なる人への使用可否判断も可能となった．

### 4-2　周囲光照度の影響

結果3-2より，周囲光照度が高いほど認識できる明度は低下した．VOXELANの使用赤色レーザーは680 nmであり，検出器で測定する赤色レーザーもこの波長の赤色光である．そのため対象物からのレーザー反射光と同時に検出器へ入射した周囲光の同波長の光も測定の対象となる．つまり周囲光が対象物へ当たり反射した光も，検出器へ入った場合は収集データとなる．周囲光は蛍光灯を用いるため，680 nmの色相成分の光が混在する．そのため周囲光量が多くなれば対象物からの反射光が多くなり，VOXELANが認識する閾値も低下した．

### 4-3　周囲光色温度の影響

周囲光照度の影響からも，VOXELANで使用される680 nmの赤色レーザーが照射レーザー以外から混入すると，認識能へ影響することが確認された．昨今では，患者の心理的な影響を考慮して，意図的に室内の明かりの色を変えることも行われている[6]．さらに蛍光灯でも，電球色・昼白色・昼光色などの明かりやLEDを用いたものまで使用されるようになった．

一般的に治療室内で用いられている蛍光灯の色は昼白色（5000 K）である．

結果3-3からも，色温度の違いによる認識能の違いは見られなかった．本研究で用いた色温度での光の波長成分を確認したところ，3000 K辺りの電球色の照明では黄色から赤色成分が主であり，青色・緑色の成分が少ないことが分かった（Fig.10）．また5000 Kの昼白色や6000 Kの昼光色の照明では，青色・緑色・

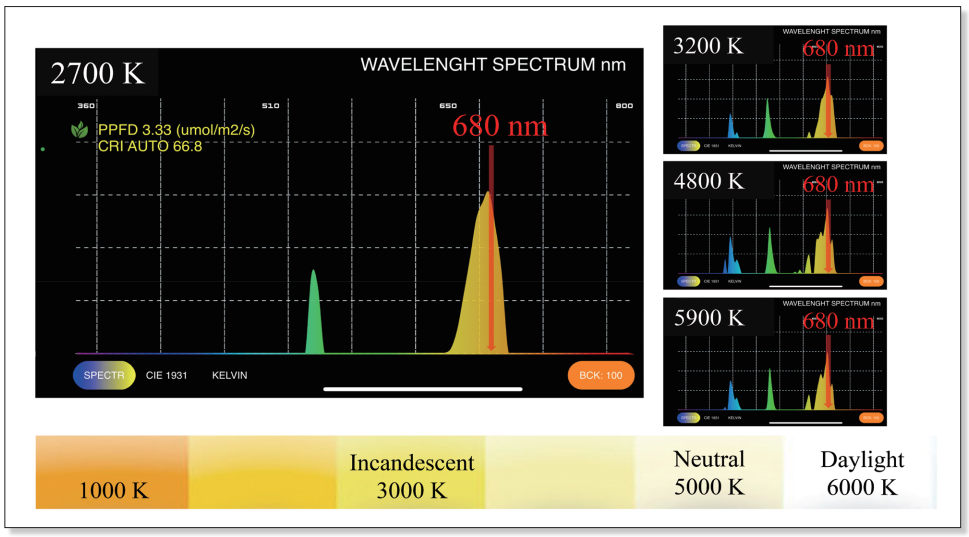


Fig.10　Wavelength components of LED lighting.

The laser wavelength used by VOXELAN is 680 nm, so there is a high possibility of misrecognition in the surrounding light with a color temperature of 2700 K, where components of that wavelength are relatively prominent.

赤色がほぼ均等な分布となっている．以上のことからも，本体から照射される赤色レーザーの成分以外の混入に関しては，周囲光の色温度には影響されず，その光量に依存すると，結果3-3からも考えられる．

さらに結果3-3で見られた周囲のノイズについては，本体から照射された赤色レーザーの照射量を上回るような赤色成分が検出器に入射したことによって，誤認識が起こったと思われる．つまり色温度が低い周囲光の場合，他の色温度と比較し，同照度であっても赤色成分が相対的に多くなるため，そこに含まれる多くの680 nmの波長の光が検出器に混入するため，反射光量の少ない対象物の辺縁付近で顕著に誤認識が起きたと思われる．これについては，680 nmの波長を減弱できるフィルターの使用や，室内照度を下げることによって検出器へ入射する波長成分を減らすことで，誤認識の影響を減らせると考えられる．

## 5. 結　語

本研究で用いた3次元体表面スキャナーVOXELAN HEV-600Mは，日常臨床における照明環境下では問題なく使用できることが明らかとなった．ただし，赤色光を用いるため，対象物の色や周囲からの混入光の色に注意が必要である．さらにVOXELANによる肌色の認識能閾値についてはVon Luschan's chromatic scale No.28であることが明らかとなり，今後の使用判断の基準になると考える．

## 6. 利益相反

本研究で使用したVOXELAN® HEV-600Mは，株式会社浜野エンジニアリングより山梨大学との共同研究のため提供されたものである．

## 謝　辞

本研究は，日本診療放射線技師会学術研究助成金による研究の成果である．

なお，本研究の一部要旨は2022年9月17日に開催された第38回日本診療放射線技師学術大会において発表した．

### 表の説明

Table 1　照度の違いが認識率へ及ぼす影響を調べるための組み合わせ表．

Table 2　色温度の違いが認識率へ及ぼす影響を調べるための組み合わせ表．

### 図の説明

Fig.1　VOXELANの概要．
VOXELANは，天井つり下げの本体から赤色レーザーを対象物へ照射（左右2カ所）し，その反射光を本体のカメラ（中央部）で連続撮影することで立体形状を把握することができる．基準データとの位置変位量をカラーマップ（左上図）や，プロファイルで表示可能である（左下図）．

Fig.2　色相評価用の24色のRGBカラーコード．

Fig.3　色の明るさ評価用の25色のグレースケールコード（表は白と黒を追加）．

Fig.4　認識率の求め方．
認識率は，VOXELANのプロファイルを表示する機能を用いた．右の図の青線は基準位置を示し，赤線は認識した物体の位置を示している．

Fig.5　色相の違いによる認識能の違い．
C9からC17の色は認識できなかった．

Fig.6　肌の色の違いによる認識能の違い．
スキンカラーNo.29より暗い色は認識されなかった．

Fig.7　周囲光の色温度の違いによる各照度が認識率に及ぼす影響．

Fig.8　周囲光の照度の違いによる各色温度が認識率に及ぼす影響．

Fig.9　周囲光の色温度が認識に影響した一例．
周囲光の色温度の違いによって，対象物の辺縁で画像のひずみが発生した．左画像の赤い領域は，基準位置と比較して高い値を示す．

Fig.10　LED照明の波長成分．
VOXELANが使用するレーザー波長は680 nmであるため，その波長の成分が相対的に多い2700 Kの周囲光では誤認識が発生する可能性が高い．

### 参考文献

1）Dawson LA, et al.: Advances in Image-Guided Radiation Therapy. J Clin Oncol, 25(8), 938-946, 2007.
2）Lachaine M, et al.: Intrafractional prostate motion management with the Clarity Autoscan system. Med Phys Int, 1(1), 72-80, 2013.
3）Bert C, et al.: A phantom evaluation of a stereo-vision surface imaging system for radiotherapy patient set-up. Med Phys, 32(9), 2753-2762, 2005.
4）Freislederer P, et al.: Recent advances in Surface Guided Radiation Therapy. Radiat Oncol, 15(1), 187, 2020.
5）Gupta V, et al.: Skin typing: Fitzpatrick grading and others. Clin Dermatol, 37(5), 430-436, 2019.
6）Dalke H, et al.: Colour and lighting in hospital design. Opt Laser Technol, 38(4-6), 343-365, 2006.