原 著 論 文

3-D Auto Tracking System の開発

関田 俊明 水口 俊介 平野 恭吉

3-D Auto Tracking System

Toshiaki Sekita, Shunsuke Minakuchi and Yasuyoshi Hirano

Abstract : Movements of soft tissues surrounding the oral cavity, especially lips and cheeks, have a great influence on the masticatory and the phonetic functions. These movements can indicate the state of harmony between a denture and the soft tissues surrounding it.

The purpose of this study was to develop a real-time measuring system for three-dimensional movements of soft tissues. This system consists of two Video Trackers, which are placed stereographically and provide two-dimensional data of the movement. Three-dimensional coordinates of movements in points can immediately be calculated by a computer. We examined the accuracy of this system using the computerized XYZ pulse stage.

The result was as follows :

The resolution of the measuring system was $0.10 \times 0.10 \times 0.10$ mm. The measurement was carried out in the area of 24.0 (x) $\times$ 20.0 (y) $\times$ 20.0 (z) mm with the working distance of 500 mm and with the frequency of 120 Hz.

Key words : soft tissue movement, three dimensional measurement, real-time, Video Tracker

I. 緒 言

全部床義歯が口腔内で十分に機能を果たすためには、その形態が周囲組織と機能的に調和していなければならない^{1,2)}。したがって義歯周囲の軟組織の挙動を明らかにすることは重要な問題である。そのため当教室では、圧力センサを用いて、歯列³⁾あるいは義歯⁴⁾に及ぼされる組織圧について解析を進めてきた。

また軟組織の動きに関して、水口⁵⁾はステレオ写真を用いた三次元形態測定システムにより口腔機能時の口唇・頬の動きについて報告した。また近藤⁶⁾は無歯顎者において義歯装着時と非装着時の口唇の動きを計測し、義歯が口腔軟組織の動態に与える影響を検索した。しかしながら、これらの三次元的データは軟組織の動きに伴う位置変化を運動の前後で捉えた非連続的なデータであり、動きの連続的なデータを捉えるまでには至っていない。

そこで、本研究では二次元位置センサであるビデオトラッカー 2 台により口唇・頬の動きを三次元時系列データとして得られるシステムを開発し、その精度を検討した。さらに、開閉口運動を同時記録可能なシス

東京医科歯科大学歯学部高齢者歯科学講座
The Department of Geriatric Dentistry, Faculty of Dentistry, Tokyo Medical and Dental University
平成 5 年 12 月 1 日受付

図 1 システム全景

図 2 SYSTEM BLOCKDIAGRAM

テムとし、機能時の口唇、特に口角の動きを捉えることを試みた。

II. 3-D Atuo Tracking System

本システムはビデオトラッカーARTIST G 140 (応用計測研究所社製)、スキャンコンバータ G-SCI-120/60 (応用計測研究所社製)、ビデオモニタ VM-900 (日立電子(株)製)、RS 422/RS 232 C インターフェースボード RS 422-SIF (エル・エス・アイジャパン社製)、PC-9801 RA 5 (NEC 社製) により構成されている。2 台の ARTIST G 140 をステレオ配置し、それぞれから出力される二次元データを解析写真測量の原理 (DTL 法)⁷⁾ によって三次元座標に変換した。図 1 に本システムの全景を、図 2 にブロックダイアグラムを示す。

本システムの特徴として、(1) 軟組織に歪みを与えない非接触型の測定装置である、(2) 測定対象と装置との厳密な位置関係を規定する必要はなく、基準点を測定対象の周囲に最初のみ取り付けただけでよいので迅速かつ簡便な測定が可能である、(3) 測定点の三次元座標がリアルタイムで数値化して得られる、(4)

図 3 ビデオトラッカーのブロックダイアグラム

表 1 ビデオトラッカー (ARTIST G 140) の仕様

大きさ	: 100 (W) × 50 (H) × 200 (D) mm
重量	: 1 kg
位置分解能	: 256 (H) × 192 (V) 画素
画素の縦横比	: 1 : 1
最大サンプリング数	: 120 Hz
計測チャンネル数	: 2 チャンネル

精度が優れていることがあげられる。

1. ビデオトラッカー

ビデオトラッカーは、ITV カメラの画像中の輝度の違う標点の重心の動きを自動的に追跡し、二次元データとして出力する intelligent device である。図 3 に ARTIST G 140 のブロック図を、表 1 にその仕様を示す。

計測の原理は以下の通りである。(1) レンズを通して MOS 型固体イメージ・センサに結像した画像は、ダイレクトに画像処理部へ送られ、2 値化情報に変換される。(2) この 2 値化された画像情報は、専用並列ハードウェアよりなる演算処理部で処理され、2 つの移動物体の重心位置、距離、角度、面積等のデータが毎秒 120 回リアルタイムで計測される。(3) その結果は RS-232 C インターフェースを通じて、ホストコンピュータへ 19200 bps で伝えられる。

本装置は MOS 型固体イメージセンサを使用しており、このセンサ部で直ちにデジタル変換されるので、外来ノイズや時間的・温度的ドリフトの影響を受けにくい。また 2 値化処理によって標点を検出するため、LED やマグネットなどの特殊な標点を貼付する必要がなく、無拘束状態で計測が可能である。

本機は標点の位置、すなわち、重心を演算部において図 4 に示すように計算している。これは 2 値図形の 1 次モーメントに相当し、物体の中心位置を示すのに最も一般的な値である。さらに、雑音や標点周辺のぼけに対して強く、また背景の明るさの変化に影響されにくいなどの特徴がある。

重心: (gx, gy)

$$gx = \frac{\sum_y \left(\frac{\sum_x (x \cdot p(x, y))}{\sum_x \sum_y p(x, y)} \right)}{\sum_y \left(\frac{\sum_x (y \cdot p(x, y))}{\sum_x \sum_y p(x, y)} \right)}$$

$$gy = \frac{\sum_x \left(\frac{\sum_y (y \cdot p(x, y))}{\sum_x \sum_y p(x, y)} \right)}{\sum_x \left(\frac{\sum_y (x \cdot p(x, y))}{\sum_x \sum_y p(x, y)} \right)}$$

図 4 ターゲットの位置の計算法

図 5

2. 三次元座標計測原理

2 台のトラッカーから出力される二次元座標を以下に述べる Direct Linear Transformation 法⁷⁾によって三次元座標に変換した。

空間上の点 P の座標 XYZ と、トラッカーの撮像面に投影された点 P の座標 xy の間には図 5 に示す (1) 式の関係が成立する。これを展開し整理すると (2) 式になり、左右 2 台のトラッカーを用いるため 1 個の点に対して 4 個の式が発生する。すなわち、行列 T の要素および左右トラッカー上での点 P の平面座標 x_1, y_1, x_2, y_2 が既知であれば点 P の三次元座標 XYZ を求めることができる。ここで変換行列 T の要素は 12 個であるため、6 個以上の三次元座標既知の基準点とそれらの点のトラッカー上での平面座標から、それぞれのトラッカーに関する変換行列 T_1, T_2 が求められる。この変換行列 T_1, T_2 と時系列出力される標点の

図 6

左右トラッカー上での平面座標から標点の三次元座標を求めてゆく。

DTL 法は従来の解法に比べ計算時間が短い、プログラミングが容易であるという長所がある⁷⁾。また本システムではレンズ歪の少ない標準レンズを使用し、さらに撮像面の歪も考慮しなくてよいので、セルフキャリブレーションなしの DTL 法を採用した。

III. 較正実験

ARTIST G 140 2 台をカメラスタンドに固定し、XYZ パルスステージ PS 100-100-100 XYZ (オプテック社製) に設置した LED を標点とし較正実験を行った。すでに、ビデオトラッカーを 1 台使用した時の XY 出力の歪み、標点の大きさの影響、追跡するウインドの大きさの影響、被写界深度の影響、光軸の傾きの影響については報告した⁸⁾。本報では 2 台をステレオ配置した時の三次元計測精度について検討を加えた。

1. 2 台のビデオトラッカー間の距離の影響

2 台のビデオトラッカー間の距離の相違による XYZ 出力の影響について検討した。測定条件は、撮影距離を 500 mm に固定し、図 6 に示すように仰角を 30°, 45°, 60°, 90° の 4 段階に設定した。次に標点を 2.5 mm 間隔で 20×20×20 mm の立方格子を移動させ 729 点測定した。使用した XYZ パルスステージの精度は、JIS 規格に準拠しており、位置決め精度 0.010 mm、平行度 0.045 mm、XYZ 直角度 0.040 mm である。

2. 変換行列 T の影響

通常、基準点の精度、基準点数およびその配置の均一性が向上することにより測定精度は向上する⁷⁾。三次元座標計測原理の項で述べたように、基準点の三次元座標とトラッカー内での二次元座標から変換行列 T の 12 個の要素を求めるが、T の要素の 1 個は系全体のスケールファクターとなるため既知である。したがって (基準点数 $\times$ 2) 個の連立方程式から最小二乗法を適用し 11 個の解を決定するのが適当であるが、1 個の基準点の測定誤差が全体に伝播するおそれもあり、本システムのように基準点を厳密に設定できる場合は必ずしもよいとは限らないと考えられる。また基準点を必要以上に多くすることは測定を煩雑にし、誤差が混入する確率も高くなると考えられる。そこで変換行列 T を求める方法を (1) GAUSS-JORDAN Method (基準点 6 点で最小二乗法を適用しない)、(2) 最小二乗法 (基準点 6 点で最小二乗法を適用する)、(3) 最小二乗法 (基準点 8 点で最小二乗法を適用する) の 3 種に設定し測定を行い、その影響について検討した。測定条件は撮影距離を 500 mm とし、2 台のビデオトラッカー間の仰角を 60° とした。そして $20 \times 20 \times 20$ mm の立方格子を上を 1.0 mm 間隔で標点を移動させ、9,261 点測定した。

IV. 実験結果および考察

1. システムについて

本研究の目的は、軟組織の三次元的な動きを時系列のデータとして測定する実用的なシステムを開発することである。従来より軟組織の三次元的な動きを追跡する方法としてモアレと映画法の併用⁹⁾があるが、本法は解析に長時間を要し、他現象記録との同期も困難である。同様に高速ビデオを用いたシステム¹⁰⁾では多点計測できる長所を持つが、三次元データとなるには時間がかかり、リアルタイム性に乏しい、また下顎運動記録では MKG, PSD¹¹⁾などが用いられているが、これらはマグネット、LED などの特殊な標点を貼付する必要があるため、口唇などの軟組織の微妙な動きを追跡するには不適当であると考えられる。

本システムはこれらの欠点を解決しており、軟組織に歪みを与えない非接触型の測定装置であり、測定点の三次元座標が毎秒 120 Hz でリアルタイムに数値化して得られ、MKG, PSD のように軌跡を確認しながら測定できるという特徴を備えている。さらに測定対

図 7 2 台のビデオトラッカー間の距離の影響

象と装置との厳密な位置関係を規定する必要はなく、測定対象の周囲に最初の 1 回のみ基準点を取り付けるだけでよいので、迅速かつ簡便な測定が可能である。したがって、ばらつきが大きく多数のデータが必要となる軟組織の動きの解析には適していると考えられる。

2. 較正実験

1) 2 台のビデオトラッカー間の距離の影響

図 7 に結果を示す。仰角が 30° から 90° に変化しても、X, Y 成分の残差平方和の変化は小さかった。しかし、Z 成分の残差平方和は X, Y 成分に比べ、仰角の変化による影響を強く受けた。仰角 60° のときその残差平方和は最小になった。一般的に 2 台のカメラの光軸が平行である場合には、基線比 (撮影距離/カメラ間の距離) が 1 に近づくに従い、奥行き方向 (Z 成分) の精度は向上する⁷⁾。本研究の場合 60° で残差が最小になったのは、収れん撮影であるということと、基準点が 6 点と少ないため撮影方向によって画面上での基準点配置が変わったことに起因すると考えられる。すなわち本システムでの基準点配置では 2 台のビデオトラッカー間の仰角を 60° とした時、残差が最小となるといえる。したがって以降の測定では 2 台の角度を 60° とした。

2) 変換行列 T の影響

表 2 に結果を、図 8 にそのときの残差の分布を示す。GAUSS-JORDAN Method に比べ、最小二乗法のほうが XYZ 各成分ともに残差平方和が小さくなった。また、基準点の数については 6 点のほうが 8 点より残差平方和が小さくなった。しかし、各方法とも r の残差平方和の平均 (平均測定誤差) では 1.0×10^{-3}

表 2 各法による残差の影響

	GAUSS-JORDAN Method				最小二乗法 6 点				最小二乗法 8 点			
	X	Y	Z	r	X	Y	Z	r	X	Y	Z	r
残差 最小	-1.30	-1.20	-2.71	0.00	-1.65	-0.92	-2.53	0.03	-2.34	-0.99	-3.09	0.02
残差 最大	1.42	1.48	2.66	2.88	1.39	1.59	2.52	2.70	1.26	1.16	2.33	3.18
残差平方和の平均	0.22	0.28	0.90	1.09	0.22	0.35	0.55	0.99	0.23	0.12	1.03	1.05

$$r = \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2} \quad (\times 10^{-1} \text{ mm})$$

図 8 残差の分布

mm の違いしか生じなかった。

残差の分布では各方法とも 0.05～0.14 mm までの範囲に全体の 70～82% が分布した。基準点 6 点の最小二乗法による場合、測定誤差 0.10 mm 以下では全体の 59.1%，0.15 mm 以下では全体の 92.4% の測定点が分布した（表 3）。

理論的には最小二乗法（8 点），最小二乗法（6 点），GAUSS-JORDAN Method の順に測定誤差が少ないはずである⁷⁾。今回そのようにならなかったのはビデオトラッカーからの出力データの精度が 2.0×10^{-3} であるのに起因すると考えられる。すなわちビデオトラッカーでの 2 値化誤差の影響のほうが各アルゴリズムの精度に及ぼす影響より大きかったと考えられる。そこで本システムでは、本実験結果および基準点測定 of 簡便性を考慮し、最小二乗法（6 点）によるアルゴリズムを用いた。

以上を総合し、今回のシステム全体の仕様を表 4 に示した。すなわち、75 mm ITV レンズと 15 mm エクステンションリングを用いたときの計測範囲は

表 3 3-D Auto Tracking System の誤差について

誤差 ($\times 10^{-1}$ mm)	割合
0.0～0.5	0.117
0.0～1.0	0.591
0.0～1.5	0.924

表 4 3-D Auto Tracking System の仕様

最大サンプリング数	: 120 Hz
計測チャンネル数	: 2 チャンネル
光学系	: 75 mm ITV レンズ + 10 mm エクステンションリング
作業長	: 50.0 cm
計測エリア	: 22.0(x) × 20.0(y) × 20.0(z) mm
位置分解能	: 0.1 mm
総合誤差	: 0.15 mm

図 9 口角運動計測用の基準点

24.0 (x) × 20.0 (y) × 20.0 (z) mm となり、1 画素の大きさはおよそ 0.1×0.1 mm となる。その時、計測エリアの 54.1% が、測定誤差 0.1 mm 以下となり、92.4% が 0.15 mm 以下となる。これは口唇運動計測には十分な精度であると考えられる。

3. 計測例

本システムを用いて、ピーナッツ咀嚼時の右側口角の動きを計測した。また開閉口運動を記録するため、オートガイ部の二次元的な動きを 1 台のトラッカーで記録した。今回用いた口角運動計測用の基準点を図 9 に

図 10 限界運動時の右側口角の軌跡

図 11-a ピーナッツ咀嚼時の作業側口角の軌跡

図 11-b ピーナッツ咀嚼時の作業側口角の時系列データ

図 12-a ピーナッツ咀嚼時の非作業側口角の軌跡

図 12-b ピーナッツ咀嚼時の非作業側口角の時系列データ

示す。三角柱のアルミフレームの各頂点に6個の小型LEDを設置し、顔面計測用の基準点フレームに取り付けた。基準点の三次元座標は当教室現有の三次元形態測定システム⁵⁾によって計測した。

被験者は顔面軟組織に異常のない、個性正常咬合を有する34歳の男性である。被験者頭部を頭部固定装置に、可及的にカンペル平面が水平になるように固定した。2値化を容易にするため、被験者の右側口角とオトガイ部周囲に、黒色の顔料を塗り、被験者右側口角の外側約3mmに、直径約1.5mmの白色球を貼付した。

口角牽引・口唇突出時、右側ピーナッツ咀嚼時、左側ピーナッツ咀嚼時の右側口角点を毎秒60回、20秒間計測した。被験者には、食品を舌背上に乗せ、咬頭嵌合位および口唇安静状態で待機させてから、計測を行った。また同時にオトガイ点も毎秒60回、20秒間

計測した。

図10に口角牽引・口唇突出時、図11に右側ピーナッツ咀嚼時、図12に左側ピーナッツ咀嚼時の口角の軌跡および時系列波形の1例を示す。突出・牽引の限界運動時には口角の動きは口唇安静時付近を最下点としたほぼ直線の軌跡を示した。右側ピーナッツ咀嚼時(計測側が咀嚼側となる)の軌跡はほぼ涙滴状の軌跡を示し、時系列波形も不規則であった。それに対し左側ピーナッツ咀嚼時(計測側が非咀嚼側)はほぼ直線運動を示し、波形も規則的であった。これは咀嚼側口角の動きには頬筋・口輪筋等の作用が顕著に表れたのに対し、非咀嚼側では主として顎運動に付随した動きしかなかったためと考えられる。

V. 結 論

著者らは二次元位置センサであるビデオトラッカー 2 台により口唇・頬の動きを、三次元時系列データとして得られるシステムを開発し精度検討を行った結果、以下の結論を得た。

1. 2 台のビデオトラッカー間の仰角 30° , 45° , 60° , 90° に変化させたとき、仰角が 60° のとき、Z 成分の残差平方和が最小になった。またそのときの X, Y 成分の残差平方和の変化は小さかった。

2. 変換行列 T を求めるとき、GAUSS-JORDAN Method に比べ、本システムで採用した最小二乗法のほうが XYZ 各成分ともに残差平方和が小さくなった。また基準点の数は 8 点より 6 点の方が XYZ 各成分ともに残差平方和が小さくなった。しかし、その差は平均測定誤差で 1.0×10^{-3} mm と小さかった。

3. 本システムの計測範囲は $24(x) \times 20(y) \times 20(z)$ mm であり、1 画素の大きさはおよそ 0.1×0.1 mm となる。その時の測定誤差は 0.15 mm 以下となる。

稿を終えるに臨み、実験にご協力いただいた被験者に謹んで感謝の意を表します。あわせて、ご援助いただいた高齢者歯科学教室の諸先生に謝意を表します。

本研究の要旨の一部は、平成 2 年度日本補綴歯科学会関東支部学術大会（平成 2 年 2 月）および第 88 回日本補綴歯科学会学術大会（平成 4 年 10 月）において報告した。

本研究の一部は文部省科学研究費補助金（課題番号：05771675）によった。

文 献

- 1) Fish, W.: Principles of Full Denture Prosthesis, sixth edition, 32~64, Staple Press, London, 1964.
- 2) Watt, D.M. and Mac Gregor, A.R.: Designing Complete Dentures, 4~97, W.B. Saunders, Phila., 1976.
- 3) 鈴木哲也：上顎中切歯、犬歯唇側面における筋圧, 補綴誌, 29: 1~14, 1985.
- 4) 安藤一夫：頬、舌が義歯にもたらす力の三次元的解析, 補綴誌, 30: 1325~1338, 1986.
- 5) 水口俊介：口腔機能時における顔表面の動き, 補綴誌, 30: 1359~1373, 1986.
- 6) 近藤修司：無歯顎者における顔表面の動き, 口病誌, 57: 393~420, 1990.
- 7) 日本写真測量学会編：解析写真測量 改訂版, 149~155, 日本写真測量学会, 東京, 1989.
- 8) 関田俊明：上顎全部床義歯の咬合時の動揺に関する研究, 補綴誌, 35: 137~150, 1991.
- 9) 橋本 淳：モアレ縞応用による顔面の動的観察—咀嚼運動の変化について—, 歯科学報, 73: 1818~1847, 1973.
- 10) 菊田大士, 奥寺 充, 川越善人ほか：PSD カメラ応用による咀嚼運動計測システム—2 次元透視投影像から得られる 3 次元位置ベクトルの合成手法—, 神奈川歯学, 18: 302~318, 1983.
- 11) 下平 修, 澤田 久, 山縣健佑ほか：無歯顎者の口腔運動の高速 VTR による三次元解析, 補綴誌, 37: 89 回特別号: 162, 1993.