

# 指タッピングの同期精度向上のための視覚刺激提示

## Visual stimulation to improve the accuracy of synchronized finger tapping

野村英祐, 鏡慎吾, 橋本浩一

Eisuke Nomura, Shingo Kagami, Koichi Hashimoto

東北大学大学院情報科学研究科

Graduate School of Information Sciences, Tohoku University

キーワード： 同期指タッピング(synchronized finger tapping), 視覚フィードバック(visual feedback), タイミング制御(timing control), 予測(anticipation)

連絡先： 〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉6-6-01 東北大学大学院情報科学研究科 橋本・岩谷研究室/鏡研究室

野村英祐, TEL 022-795-7021, FAX 022-795-7019, E-mail: nomura@ic.is.tohoku.ac.jp

### 1. 背景と目的

近年, 高速度画像の利用が広まってきている. 高速カメラにより撮影された高速度画像は通常のカメラで撮影された画像よりも, 対象とする物体の運動情報をより多く含んでいる. 特に, 撮影後にスローモーションのように実画像よりも低速化して高速度画像を提示し分析することが盛んに行われ, ヒトの眼では追うことのできない高速度な現象の理解に役立っている. 最近では, 一般消費者向けのデジタルカメラに高速度画像を撮影する機能を搭載したものが販売されている<sup>1)</sup>. この様に, スローモーションとしてのヒトへの直接提示やコンピュータによる解析などオフラインでの高速度画像の利用は盛んである.

また, リアルタイムで高速度画像を利用する研究も行われている. 特に高速カメラを用

いた機械やロボットなどのリアルタイム制御への応用における発展は目覚しく, ある限られた作業においてはであるが, 高速カメラを応用した機械制御システムがヒトよりも優れた能力を実現している<sup>2)</sup>.

このように高速度画像は機械制御にリアルタイムに利用することでその有用性を発揮しているが, ヒトがリアルタイムで直接的に利用する方法は未だ少ない. これの理由の一つとして, 高速度画像をリアルタイムでヒトへ直接に提示しても, ヒトの視覚能力の限界により画像の知覚が困難であることが挙げられる.

そこで本論文では, ヒトの作業における高速度画像および情報のリアルタイムでの利用の可能性を模索し, 新たな高速度画像および情報の提示手法を提案する. 本研究では回転運動を対象とする情報提示手法を提案する. そして提示された情報のヒトの作業への応用に

について考察する。

本研究において想定するヒトの作業は、高速かつ一定の速度で回転運動する対象物体に対して、視覚刺激により同期指タッピングを行う作業である。この同期指タッピング作業における作業精度向上に有効な視覚刺激の提示手法について考察する。提案手法により、従来の機械だけではなくヒトを対象とした高速度画像および高速カメラの新たな利用シーンやアプリケーションの創出が期待できる。さらに、提案する提示手法を実画像と合成することによって、仮想的な情報を3次元の実環境へ提示するオーグメンテッドリアリティ (Augmented Reality, 以下ARとする) としての応用も考えられる。

## 2. 提示画像の時系列操作

提案する提示手法のコンセプトについて述べる。高速度画像の時系列を操作することで画像における回転運動の速度、方向、位相を変更し、視覚刺激としてヒトに提示する。提示する画像において運動速度や順序を任意に変更された対象物体を、実対象物体であるターゲット (Target) に対して本研究では仮想ターゲット (Virtual Target) と呼ぶ。この様に実対象物体の運動の速度、方向、位相を変更し仮想的に作成した仮想ターゲットを視覚刺激として、ヒトが時間同期を必要とする作業を行うことにより、作業の精度や効率の向上を狙う。

このような、肉眼では知覚することの難しい高分解能の視覚情報を、時間スケールを適切に変換しながらかつリアルタイムに提示する概念を、一般に空間領域において拡張されたARに対し、本研究では時間領域拡張現実感と呼ぶことにする。

## 3. 視覚による同期指タッピング

### 3.1 本研究での同期指タッピングの定義

想定するヒトの作業である視覚刺激による同期指タッピングについて述べる。想定する同期指タッピングについて Fig. 1 および Fig. 2 を示す。Fig. 1 および Fig. 2 で示すように、本研究では周期的な回転運動をする対象物体に対して、ヒトが時間同期して指タッピングを行う作業を想定している。指タッピングは Fig. 1 で示すように、PC などの装置を用いて検出する。同期指タッピングで同期を取る対象物体となるのが、円の中心を回転軸の中心として回転するターゲットである。ターゲットの速度、大きさ、色については任意に定めることができるものとする。Fig. 2 の右図で示すように、ターゲットが円の頭頂部に到達した瞬間に合わせて、ヒトは指タッピングを行う。この同期指タッピングは繰り返し行うとする。

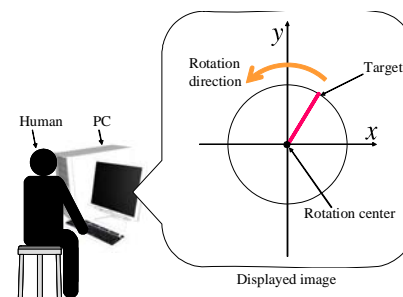


Fig. 1 想定する同期指タッピング

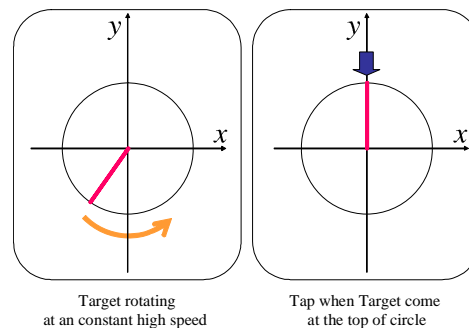


Fig. 2 対象物体の運動と同期指タッピングのタイミング

### 3.2 同期指タッピングの精度指標

作業精度を示す指標として、Fig. 3 に示すような、指タッピングが行われた時刻でのターゲットの円の頭頂部から計測した角度  $\theta^{\text{Target}}$  を用いる。本研究ではこの  $\theta^{\text{Target}}$  を角度誤差と呼ぶ。角度について Fig. 3 に示すように正の向きは回転方向と同じ向きとする。指タッピングを繰り返して行い、タッピングが行われる毎に角度誤差  $\theta^{\text{Target}}$  を測定する。角度誤差  $\theta^{\text{Target}}$  および角度誤差  $\theta^{\text{Target}}$  の平均値がゼロに近づいたとき、作業精度が向上したと考える。

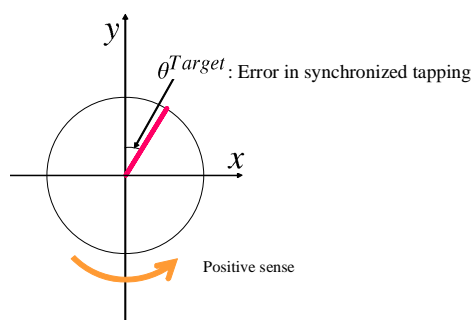


Fig. 3 角度誤差  $\theta^{\text{Target}}$

### 3.3 関連する先行研究

本研究で想定する視覚刺激による同期指タッピングなどの時間同期を必要とするヒトの作業は、リズム同期やタイミング予測制御、もしくは生体運動制御<sup>3)</sup>と考えられる。

Chen らは、視覚および聴覚刺激による同期指タッピングにおける誤差のばらつきや保持について、実験および解析を行った<sup>4)</sup>。特に視覚刺激については LED 照明を点滅させることで与えている。その結果、視覚による同期タッピングにより生じる誤差について、作業や被験者によってその値は異なるが、同期タッピングを繰り返すことである一定の時間においてある定常的な同期誤差を保持する現象を

観測した。これは同期タッピングを始めた瞬間から観測されるのではなく、数秒程度の時間同期作業を行ったときに観測された。

高橋、三宅は、Beep 音での聴覚刺激による同期指タッピングについて、周期誤差を直接制御する実験手法を開発した<sup>5)</sup>。その実験結果から聴覚を用いたタイミング機構による周期誤差訂正に注意資源が必要であることを示し、認知機構におけるワーキングメモリ仮説との関連性を指摘した。これより運動制御と認知機構の両方を備えたタイミング制御の存在を明らかにした。

沢田、石田は、視覚 運動系の生体運動制御として、周期的なリズムをもつターゲットに対するヒトの手の追従運動について実験および解析を行った<sup>6)</sup>。その結果、ある周波数でターゲットが周期的な往復運動をした場合に、手の運動がターゲットの運動に対し先行性を示すことを確認した。また、リズムカルな運動を追従する手の運動について解析モデルを提案した。

これらの先行研究により、ヒトの感覚 運動系には誤差を最小とするための予測機構が備わっていることが示された。これらの先行研究およびそれによって得られた知見に基づき、本研究ではヒトに適切な視覚フィードバックを与えることで同期指タッピングを制御し、その作業精度の向上させることを目指す。

## 4. 提案する提示手法

### 4.1 提示手法の概要

本研究ではこの定常的な角度誤差を踏まえ同期タッピング精度を向上させるため、提示画像における実際の対象物体であるターゲットと同期した仮想ターゲットの提示手法を提案する。提案手法は PLL (Phase locked loop) に

よるターゲットと仮想ターゲットとの位相同期および視覚フィードバックにおける時間遅れの補償から成る。これは視覚フィードバックの時間遅れとそれによる同期指タッピングの位相遅れを解決するための方策である。先行研究<sup>4)</sup>によれば視覚フィードバックの遅れにより、ターゲットに対する同期指タッピングが遅れ、定常的な角度誤差すなわち位相遅れが生じるとされている。そこで本研究における視覚刺激による同期指タッピングにおいても、同様に定常的な角度誤差が存在することを仮説 (1) とする。仮説 (1) が成り立つとすると、PLL による位相同期を利用して同期指タッピングにおける定常的な角度誤差すなわち位相遅れを、仮想ターゲットの周波数すなわち角速度を制御し視覚刺激として提示することで、ヒトの同期指タッピングにおける位相遅れを減少させることが可能であると考える。

#### 4.2 視覚刺激としての提示画像

視覚刺激として、PC から接続されたディスプレイに画像を表示しヒトへと提示する。提案手法では仮想ターゲットの運動のみを視覚刺激として提示する。実対象のターゲットの運動は提示しない。同期指タッピングのタイミングを直感的に分かりやすくヒトに提示できるためである。そのため提示される画像は Fig. 2 で見られるターゲットと外見上は全く同じ画像である。

#### 4.3 ターゲットと位相同期する仮想ターゲットの作成手法: PLL の応用

PLL の概要について述べる<sup>7)</sup>。

Fig. 4 に示すように、PLL の基本構成要素は位相比較器 (Phase Frequency Comparator)、フィルタ (Filter)、制御発振器 (Voltage-

controlled oscillator, 以下VCOとする) である。PLL は入力信号に同期することで要求される信号を出力する回路である。位相比較器で得られた2つの入力の位相差情報は制御発振器にフィードバックされ、制御発振器はこのフィードバックされた位相差情報に基づいて発振周波数を制御する。制御発振器の周波数は、位相差が決められた値になるように制御され、通常位相差がなくなるように行われる。

次に提案手法における位相同期回路について述べる。位相同期回路を Fig. 5 に示す。本研究において、同期指タッピングの精度指標である角度誤差  $\theta^{\text{Target}}$  はターゲットと仮想ターゲットとの位相差に相当する。提案手法における位相同期回路においては一種の位相比較器として、同期指タッピングにおける同期精度の指標となる角度誤差  $\theta^{\text{Target}}$  の値を直接利用する。角度誤差  $\theta^{\text{Target}}$  を減少させるために、仮想ターゲットの周波数すなわち角速度を制御する。仮想ターゲットの角速度を  $\omega^{\text{Virtual}}$  とする。角速度  $\omega^{\text{Virtual}}$  について、簡易的な低域通過型フィルタとして LPF (Low Pass Filter, 以下LPFとする) を使用し、位相同期に不必要な高周波の成分を除去する。LPF 通過後の角度誤差の値を  $K_n$  とする。 $K_n$  の式は

$$K_n = k\theta_n^{\text{Target}} + (1 - k)K_{n-1} \quad (1)$$

となる。ここで  $n$  は同期指タッピングの回数を示す。式 (1) における係数  $k$  によって LPF の性能を決めることができる。

位相差情報である  $K_n$  を制御発振器である VCO に制御信号として入力する。制御信号と制御発

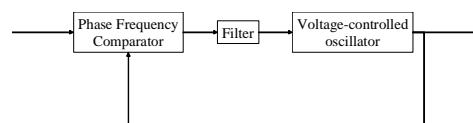


Fig. 4 PLL の基本構成

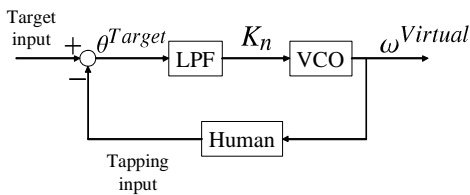


Fig. 5 提案手法における位相同期回路

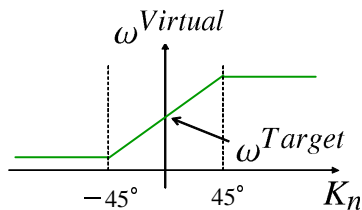


Fig. 6 制御発振器 (VCO) の制御信号と出力周波数の関係

振器の出力周波数の関係を Fig. 6 に示す．周波数可変範囲に限界があることから，Fig. 6 のように，出力周波数はある値で飽和する．提案手法においては，同期指タッピング中に大きく同期対象の周波数が変化することは望ましくないと考え，位相差情報を反映する範囲を  $-45^\circ < K_n < 45^\circ$  と定め，それによって周波数可変範囲を設定した．制御信号である  $K_n$  と出力周波数  $\omega^{\text{Virtual}}$  の関係式は

$$\omega^{\text{Virtual}} = aK_n + \omega^{\text{Target}} \quad (-45^\circ < K_n < 45^\circ) \quad (2)$$

一般には周波数可変範囲が広いことは，入力信号の周波数に対して広い範囲で同期できる点と，大きな周波数変化を起こし速い位相変化を発生できる点で有利であるとされる．

## 5. システムの構成

### 5.1 実験システムの構成

実験に用いたシステムの構成を Fig. 7 に示す．本研究のシステムでは，画像提示および計算処理に PentiumD 3.2 GHz 及びメモリ 2 GByte を持つ PC を用いた．視覚刺激

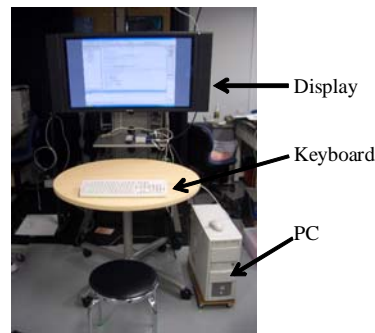


Fig. 7 システム構成

Table 1 TH-42PHD8K 仕様

ディスプレイパネル	42 V 型 (アスペクト比 16 : 9)
階調数	2048 階調 (最大)
コントラスト比	明所 330 : 1, 暗所 3000 : 1
画面寸法	幅 920 mm × 高さ 518 mm × 対角 1,056 mm
画素数	786,432 画素 (水平 1,024 times 垂直 768) [ドット数 3,072 times 768 pixels]
動作使用条件	温度: 0 °C ~ 40 °C, 湿度: 20 % ~ 80 %
対応周波数	水平 15 [Hz] ~ 110 [Hz]
(ミニ D-sub 15 ピン接続時)	垂直 48 [Hz] ~ 120 [Hz]

の提示および指タッピングの検出は単一のプログラムによって制御および実行した．プログラムの開発環境には Microsoft Visual Studio 2005 を用い，プログラミング言語には C++ を用いた．同期指タッピングの検出にはキーボードを用い，打叩するキーは被験者が任意で選択した．キーボードキーの大きさは最小のもので縦: 約 15 mm 横: 約 15 mm，最大のもので縦: 約 30 mm 横: 約 20 mm の表面積を持つ．ディスプレイに Panasonic 社製の 42 インチハイビジョンプラズマディスプレイ，TH-42PHD8K を用いた．ハイビジョンプラズマディスプレイ TH-42PHD8K の各種仕様は Table 1 の通りである．

## 6. 実験用プログラム

実験で用いたプログラムについて述べる．実験用プログラムのフローチャートを Fig. 8 に示す．フローチャートにおいて示すように実験プログラムはマルチスレッド化されている．スレッドの作成には Win32API の createthread 関

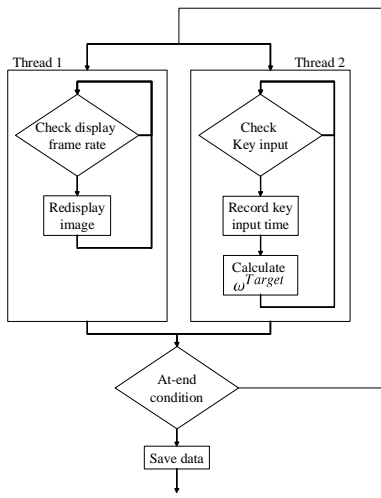


Fig. 8 実験用プログラムのフローチャート

数を用いる．スレッド1によってディスプレイのフレームレートを制御し画面の描画を行う．画面の描画には，コンピュータビジョン向けライブラリである OpenCV を用いた．スレッド2によってキー入力の検出とキー入力がなされた時間の記録，キー入力時間より求まる角度誤差  $\theta^{\text{Target}}$  に対する LPF の適用および周波数発振器による  $\omega^{\text{Virtual}}$  の出力について計算を行う．

## 7. 視覚刺激として提示する画像

4.2 節 で述べたように，視覚刺激としてハイビジョンプラズマディスプレイに対象物体であるターゲットおよび仮想ターゲットを提示する．提示する画像を Fig. 9 に示す．Fig. 9 において赤い線が同期指タッピングの対象物体であるターゲットである．実験において提示されるターゲットおよび仮想ターゲットは Fig. 9 で示したような 1 本の直線である．ターゲットおよび仮想ターゲットの色は，本研究では被験者が容易に視認できる色を考慮し赤色を用いた．

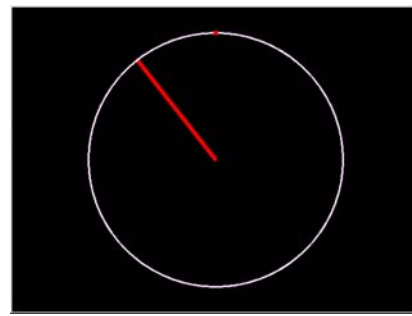


Fig. 9 ディスプレイによる視覚刺激の提示

## 8. 実験概要

提案手法による同期指タッピングの作業精度の向上を評価する実験を行う．被験者には椅子に座り，3.1 節 で示したように周期的に提示される視覚刺激とキーボードのキー打叩を同期させるように指示した．これを同期指タッピング課題とする．被験者各自が打叩するキーを任意に選択することにした．実験において用いた各パラメータの基本値は Table 2 の通りである．特に記述がない限り，実験ではこれらのパラメータを利用する．

Table 2 実験における各パラメータの基本値

ターゲットおよび仮想ターゲットの円の半径	200 pixel (画面上の長さ: 約 135 mm)
ターゲットおよび仮想ターゲットの線の太さ	5 pixel (画面上の太さ: 約 3.4 mm)
ターゲットの角速度 (周波数) $\omega^{\text{Target}}$	$10 \times 2\pi$ [rad/s]
PLL の VCO における係数 $a$	0.006

## 9. 実験内容

以下に述べる 8 つの実験を行った．実験 1 から 6 について 6 人の被験者 (男性 6, 平均年齢 22.0) を対象に同日内で，実験 7, 8 について 6 人の被験者 (男性 6, 平均年齢 23.0) を対象に同日内で行った．いずれの被験者も視力および運動に障害はなく，同期指タッピング課題には，事前に練習課題を通して実験遂行可能な程度に習熟していた．被験者には高度な音楽の専門教育を受けたものはいなかつ



た．各々の実験は目的別に Table 3 に示す通り分類できる．また各々の実験におけるパラメータを以下の Table 4 に示す．

実験 1 では，仮説 (1) で述べた視覚による同期指タッピングにおいて発生する定常的な角度誤差について確認する．被験者に擬似的に低速化したターゲットを提示する．それに対する同期指タッピング課題を被験者に課し，角度誤差  $\theta^{\text{Target}}$  と LPF を通した角度誤差である  $K_n$  を 40 秒間測定し記録する．

実験 2 では，提案する視覚刺激の提示手法による同期指タッピングの作業精度の向上を確認する．提案手法を用いて，仮想ターゲットを被験者に提示する．提示された仮想ターゲットに対する同期指タッピング課題を被験者に課し，角度誤差  $\theta^{\text{Target}}$ ，LPF 通過後の角度誤差である  $K_n$ ，および同期タッピング時の仮想ターゲットの角度誤差  $\theta^{\text{Virtual}}$  について 40 秒間測定し記録する．

実験 3 および実験 4 では，提案する視覚刺激の提示手法における，提示画像のサイズの影響を確認する．提示する画像のサイズについて，ターゲットの円の半径の大きさを 300 pixel (画面上の長さ: 約 202 mm) および 100 pixel (画面上の長さ: 約 67.5 mm) に変更し，それぞれの場合について同様の同期指タッピング課題を被験者に課した．この実験において実験 2 と同様に  $\theta^{\text{Target}}$ ， $K_n$ ， $\theta^{\text{Virtual}}$  を 40 秒間測定し記録する．

実験 5 および実験 6 では，提案する視覚刺激の提示手法における，ターゲットの線の太さの影響を確認する．提示する画像のターゲットの線の太さについて，10 pixel (画面上の太さ: 約 6.7 mm) および 1 pixel (画面上の太さ: 約 0.67 mm) に変更し，同様の同期指タッピング課題を被験者に課した．この実験において実験 2 と同様に  $\theta^{\text{Target}}$ ， $K_n$ ， $\theta^{\text{Virtual}}$  を 40 秒

Table 3 8 種類の実験内容

提案手法による位相制御	実験目的	実験番号
なし	仮説 (1) の実証	実験 1
	提案手法による作業精度の向上の確認	実験 2
	画像サイズを大きくした場合の影響の確認	実験 3
あり	画像サイズを小さくした場合の影響の確認	実験 4
	ターゲットの線を太くした場合の影響の確認	実験 5
	ターゲットの線を細くした場合の影響の確認	実験 6
なし	実験 8 の対照実験	実験 7
あり	LPF の係数を変更した場合の影響の確認	実験 8

Table 4 8 種類の実験パラメータ

実験番号	提案する提示手法	ターゲットのサイズ	ターゲットの線の太さ	LPF の係数
実験 1	なし	200 pixel	5 pixel	0.1
実験 2	あり	200 pixel	5 pixel	0.1
実験 3	あり	300 pixel	5 pixel	0.1
実験 4	あり	100 pixel	5 pixel	0.1
実験 5	あり	200 pixel	10 pixel	0.1
実験 6	あり	200 pixel	1 pixel	0.1
実験 7	なし	200 pixel	5 pixel	0.1
実験 8	あり	200 pixel	5 pixel	0.5

間測定し記録する．

実験 7 および 8 では，提案手法における LPF のパラメータを変更し，作業精度の向上を確認する．実験 7 および 8 ではその他の実験とは異なる被験者が含まれるため，実験 8 に対する対照実験として改めて提案手法を適用しない実験 7 と，提案手法を適用する実験 8 を LPF のパラメータを 0.1 から 0.5 に変更して行い， $\theta^{\text{Target}}$ ， $K_n$ ， $\theta^{\text{Virtual}}$  を 40 秒間測定し記録する．

## 10. 実験結果

実験結果について述べる．同期指タッピングの対象物体であるターゲットの角度誤差  $\theta^{\text{Target}}$  を緑の + 印と点線によって，LPF 通過後の角度誤差である  $K_n$  を青の \* 印と破線によって，同期タッピング時の仮想ターゲットの角度誤差  $\theta^{\text{Virtual}}$  を赤の四角印と実線によってグラフに示す．ただし実験 1 においては，提案する提示手法を利用していないため，角度誤差  $\theta^{\text{Target}}$  を緑の + 印と点線および LPF 通過後の角度誤差である  $K_n$  を青の \* 印のみ表示している．

実験 1 の結果の一部を Fig. 10 に示す．Fig. 10 に示されるように，同期指タッピングを繰り返

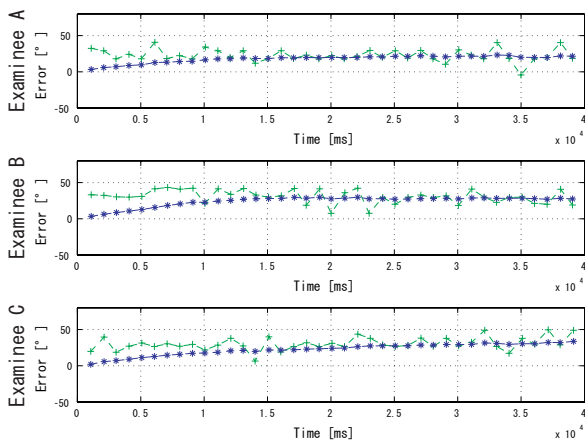


Fig. 10 実験 1 の結果の一部

し行うことで被験者により異なる定常的な角度誤差  $\theta^{\text{Target}}$  が測定された。このことから視覚フィードバックの時間遅れにより、対象物体であるターゲットに対して同期指タッピングが位相遅れを生じていると考える。被験者により測定される定常的な角度誤差の値が異なるのは、本研究における同期指タッピングに対して被験者毎に異なる位相遅れをもって、同期指タッピングを実行していたことを示している。これは被験者によって同期指タッピングにおいて視覚刺激を知覚する視覚的能力、指タッピングを行う運動能力などが異なることを示していると考えられる。

実験 2 の結果の一部を Fig. 11 に示す。Fig. 11 に示されるように、角度誤差  $\theta^{\text{Target}}$  がゼロ付近で推移する現象が測定された。LPF を通した角度誤差である  $K_n$  はゼロ付近に収束している。被験者ごとに角度誤差  $\theta^{\text{Target}}$  を平均化した結果については後の 11. 節で詳しく述べるが、全ての被験者でゼロに近い値が測定された。角度誤差  $\theta^{\text{Target}}$  は本研究における同期指タッピングの精度指標であるため、ゼロ付近に推移したことで精度が向上したと考える。これは実験 1 で測定された、同期指タッピングにおける位相遅れを、PLL による位相同期を応用した提案手法によって減少させることが

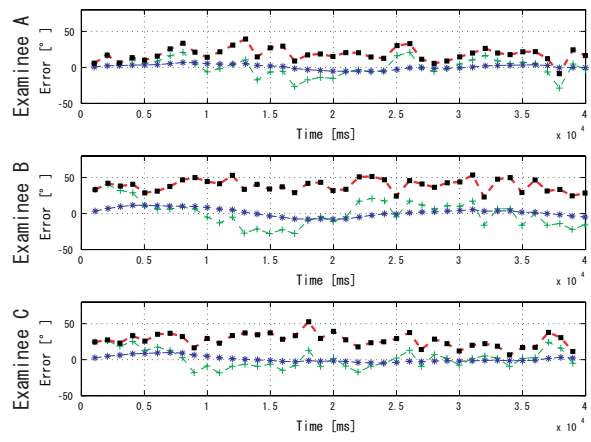


Fig. 11 実験 2 の結果の一部

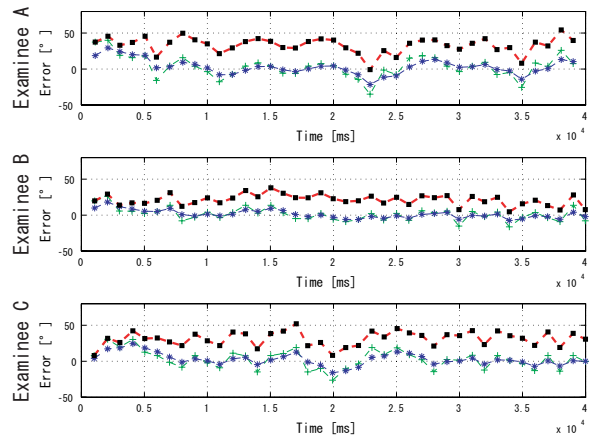


Fig. 12 実験 8 の結果の一部

できたと考える。

実験 3 から 6 について、実験 2 と同様に角度誤差  $\theta^{\text{Target}}$  がゼロ付近で推移する現象および LPF を通した角度誤差である  $K_n$  はゼロ付近に収束する現象が観測された。

実験 7 において、実験 1 と同様に同期指タッピングを繰り返し行うことで被験者により異なる定常的な角度誤差  $\theta^{\text{Target}}$  が観測された。

実験 8 の結果の一部を Fig. 12 に示す。Fig. 12 に示されるように、実験 2 と同様に角度誤差  $\theta^{\text{Target}}$  がゼロ付近で推移する現象が観測された。実験 2 の実験結果との違いについては 11. 節で詳しく述べる。

全実験について角度誤差  $\theta^{\text{Target}}$  の標準偏差と平均値について、全被験者におけるその平



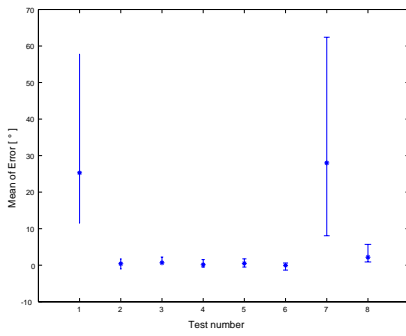


Fig. 13 全実験における角度誤差  $\theta^{\text{Target}}$  の平均値の平均値と最大値および最小値

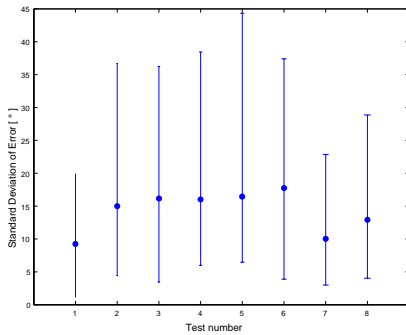


Fig. 14 全実験における角度誤差  $\theta^{\text{Target}}$  の標準偏差の平均値と最大値および最小値

均値と最大値および最小値をまとめたグラフを Fig. 13 および Fig. 14 に示す。この Fig. 13 および Fig. 14 から、提案手法を利用した実験 2 から 6 および実験 8 については平均値の値が定常的にゼロ付近の値を示していることがわかる。

## 11. 実験結果に対する解析と考察

実験結果の解析を行う。実験 1 から 8 において、各実験について角度誤差  $\theta^{\text{Target}}$  の平均値および標準偏差を要素に持つ標本をそれぞれ作成し、異なる実験間におけるそれぞれの差を検定する。2 つの標本については対応がなく等分散でないを考える。検定には有意水準 5 % の両側  $t$  検定を用いる。計算には Matlab の検定用関数 `ttest2` を用いた。検定では検定対象とする 2 つの標本の平均値が

等しいとする仮説を定める。ここで  $h$  は検定結果の出力 (0: 仮説を棄却しない, 1: 仮説を棄却する),  $p$  は  $p$  値を, Confidence Interval は信頼区間を, Test Statistic は検定統計量  $t$  値を, Degree of Freedom は自由度を, Population Standard Deviation は推定された母標準偏差を意味する。

初めに実験 2 から 6 における提示手法による同期指タッピングにおける精度向上を確認する。解析の結果、角度誤差の平均値および標準偏差についての検定結果において  $h = 1$  となり仮説が棄却され、実験 1 と実験 2 から 6 における角度誤差  $\theta^{\text{Target}}$  の平均値および標準偏差には有意な差が認められる。これにより、実験 2 から 6 における提示手法は同期指タッピングの精度向上において角度誤差の平均値をゼロに近づける点で有効である一方、角度誤差のばらつきを増大させたと考えられる。

次に、提案する提示手法における仮想ターゲットの大きさと線の太さの変更による影響を確認する。実験 2 から実験 6 の間における角度誤差の平均値および標準偏差の検定結果は全て  $h = 0$  となり、仮説が棄却される例は見つからなかった。このことから実験 2 から 6 において角度誤差  $\theta^{\text{Target}}$  の平均値および標準偏差は等しいといえる。これにより同期指タッピングに与える影響も、実験 2 から 6 においておいて等しいと考えられる。よって本研究での提案手法において、提示画像における仮想ターゲットのサイズや線の太さによらず、同期指タッピングにおける作業精度をその角度誤差の平均値において向上すると考えられる。

次に、LPF のパラメータ変更による作業精度への影響を確認する。実験 7 と実験 8 の間における角度誤差の平均値の検定結果は Table 5、標準偏差の検定結果は Table 6 となった。角

Table 5 実験 7 と 8 における  $\theta^{\text{Target}}$  の平均値の  $t$  検定結果

$h$	1.00
$p$	0.000062
Confidence Interval	[20.161387, 31.442796]
Test Statistic	11.5990
Degree of Freedom	5.2391
Population Standard Deviation	[5.3849 0.8328]

Table 6 実験 7 と 8 における  $\theta^{\text{Target}}$  の標準偏差の  $t$  検定結果

$h$	0.00
$p$	0.052330
Confidence Interval	[-5.873119, 0.035904]
Test Statistic	-2.2123
Degree of Freedom	9.6386
Population Standard Deviation	[2.0519 2.4965]

度誤差  $\theta^{\text{Target}}$  の平均値についての検定結果は  $h = 1$  となり仮説が棄却され有意差が認められた。角度誤差  $\theta^{\text{Target}}$  の標準偏差についての検定結果は  $h = 0$  となり仮定が棄却されず、標準偏差は等しいといえる。これにより、実験 8 における提示手法は  $\theta^{\text{Target}}$  のばらつきを増大させずに、平均値をゼロに近づける点で、同期指タッピングにおける作業精度を向上に有効であると考えられる。

## 12. 結言

本研究では、高速かつ一定の速度で運動する対象物体に対して、視覚刺激により同期指タッピングを行う作業を想定し、作業精度向上に有効な視覚刺激の提示手法について述べた。また、提案した提示手法を実装した実験システムを構成し、実験結果および実験結果の解析による提案手法の評価と考察について述べた。それにより提案する提示手法の有効性を示した。今後は、同期指タッピング以外にも新たな作業課題を模索し、高速度画像の利用法をより広範な分野へと広げていきたいと考える。

## 参考文献

- 1) カシオ計算機, “HIGH SPEED EXILIM EX-F1,” [http://dc.casio.jp/product/exilim/ex\\\_f1/](http://dc.casio.jp/product/exilim/ex\_f1/), (as of 2009/01/29).
- 2) Yoshihiro Nakabo, Masatoshi Ishikawa, Haruyoshi Toyoda, and Seiichiro Mizuno, “1ms Column Parallel Vision System and It’s Application of High Speed Target Tracking.” *Proceedings of the 2000 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 650–655, 2000.
- 3) 伊藤宏司, 身体知システム論 ヒューマンロボティクスによる運動の学習と制御, 共立出版, 東京, 2005.
- 4) Yanqing Chen, Bruno H. Repp, and Aniruddh D. Patela, “Spectral decomposition of variability in synchronization and continuation tapping: Comparisons between auditory and visual pacing and feedback conditions,” *Human Movement Science*, Vol. 21, Issue 4, pp. 515–532, 2002.
- 5) 高橋弘二, 三宅美博, “同期タッピングの周期的誤差制御に関わる2種類のタイミング機構 内的時間生成に基づくインターフェースについて,” 計測自動制御学会論文集, Vol. 43, No. 10, pp. 935–942, 2007.
- 6) 沢田康次, 石田文彦, “3章 リズムと感覚運動制御,” 蔵本由紀 編 リズム現象の世界, 東京大学出版会, 東京, 2006.
- 7) 木原雅巳 小野定康, “わかりやすいデジタルクロック技術,” オーム社, 東京, 2001.