Local field potentials, spiking activity, and receptive fields in human visual cortex

 $v v 0^{12\dagger} o g^{\uparrow} g^{34\dagger} v a v$

Vo I	12	go 1 2 5	g 5	Γυ c	& ".	g 5	ſ	41									
* (;	-14	0 0	f g	v 65	8	c 2	4 c 2	7302&	м g	5 [٦)	41				
5	<u>و</u> ۲	g , 6		g c	2 c g	$c\ 2\ c\ g$	4	v 65	8 c	2 4 c	2730	2 &	ж g	5	x) 1	41	
)	بر 9 70 9	C 1	Ď	5		o 1	* 1&	ж g	5 [(· 41							
*	1	110	4		¥0 () *	ľ& ".	g 5	Г с	41							
۲ <u>5</u>	ſ	Ó	5	્રિંગ	3	5	ſ (41									
ប	🌹 g	g , 6	g	4 î		0 0	3,	Ţ.	3 "9709,	×.	io -	5	0	1 5	5 m	2 & 🚙	g S

†Contributed equally to this work

*Corresponding authors (email: Fang Fang, email: ffang@pku.edu.cn; Qian Wang, email: wangqianpsy@pku.edu.cn)

Received 29 June 2023; Accepted 21 August 2023; Published online 9 November 2023

The concept of receptive field (RF) is central to sensory neuroscience. Neuronal RF properties have been substantially studied in animals, while those in humans remain nearly unexplored. Here, we measured neuronal RFs with intracranial local field potentials (LFPs) and spiking activity in human visual cortex (V1/V2/V3). We recorded LFPs via macro-contacts and discovered that RF sizes estimated from low-frequency activity (LFA, 0.5–30 Hz) were larger than those estimated from low-gamma activity (LGA, 30–60 Hz) and high-gamma activity (HGA, 60–150 Hz). We then took a rare opportunity to record LFPs and spiking activity via microwires in V1 simultaneously. We found that RF sizes and temporal profiles measured from LGA and HGA closely matched those from spiking activity. In sum, this study reveals that spiking activity of neurons in human visual cortex could be well approximated by LGA and HGA in RF estimation and temporal profile measurement, implying the pivotal functions of LGA and HGA in early visual information processing.

human visual cortex | receptive field | intracranial EEG | local field potential | spiking activity

cou u !

g

С

INTRODUCTION

١., لغد ത ž 1 VOC 1 VLO ത 1 C F νI Т g 0. 5 .1 С 1, 1 gо ٥ſ 151 ſ!(ligor o ليك 1 C 🎙) ٢ يد. (v b ! 1959) or С ത С 🎙 С بد ¢ 🎔 ž I. õ 0 0 *** 11. بر 0 VLO LC C 01 **%** 0 * b c С 11. JUC 0 الد. χr g! VFO С 1.00 0 Ö. С بد, c ! с ۲ ത് g! VFO С ŭ 0 II cu I c ! 2014) our Ø 0 - J (goſ I o ٿي មព្រល I. ٢ U ¥09 C 🔺 بہ 0 2013)ប I 41 لللد 1. £. со ത ž 0 ×9 br b g C٢ с g (î 10 V V O Q g لاير (کا بد g ٢ С 🎔) 0 */ с c L ٦ur ω‼c ļļ 01 0 ... oſ С រៅ 0 0 600 L (B) بدا ovl 0 ¥ "g 0 9) "я v !! 2008 ļļ 2007 П I. 466 1 Т r I. 2015)g VCO ¥09 go Т 6 ير r bo brr ٢ ٢ c bl Ű 0 ٢ بد بد ļ يرا ប . C VEO •0• 0 **4**0 0 19 19 C C 9 O سات 10 س บ للا

1990)

c I l co ļ Πr 0 g 0 C J D W B) بىر 0 ប 0 0 FO C Ű y íC. 2018 Bolog r ou L 1 2018 0 01 2017 🖁 🗐 🕼 Т 2019) 0 110 00 g الاير 0 - X9 00 оſ ¥091 OVg LOVg ۲ C U الد. (به فلم ...bc | [I. с C ليئد بد ļ 90) ... (VCO g c

× ۲۰۵۱ (د. In vivo 🗚 cluir or g "v 1J 10 1,00 , g CO WF ٢ ٢ ന g VIO WIGI . 0 بد, لايہ g 0 I ١Đ 0 ا بد 9 لبلته Ó بېر ٢g 1968 1 1,Q 1 1983) С (2 g C ا صب ه عام بب ع CO W vclrv 0 1/ ¥ c obgc!! Ъ b . of our 0 0 0 1. VLO I. 0 1/1 g ប _c•o o∫ fo υL ۵ 🗴 بې ប С ٧Đ 2 COW **9** J 3 С */ برير gg لار I. บ ~ WF Ø 9 C Ø, 0 بد, 0 с U 2016)T.

لايبر (... ×9 br 0 4 ٢ ¢ g ¥091 ١Ú , se Par or ിത Ò. റേത للا X ٢ 0 С "ч بعد 2017 I. 1 2016 1 2013 (Bo ,... g Т Pr 2016 Oo ... or 2007)p 1 WF C ٢ Vr I Cr CU ,... Ø 90 ۲ بد g Ó. پېيد کا ۲ 1 ير اعر с b i co <u>ال</u> rog یہ ۷ g بيہ oc≱! (B ¢ o ! 1 2019 1 2021 ! 2014 ٢

(

<u>و</u> ال

ľo po vi (1116) ب کو ا م دارد (2011 ປ 0 ⊾ 00 ະ o , ≥ 1 2012) o or cor ≭ (Prg 1 2014) بد لابد Q, I (, c , <u>n</u>, L 2020) , Q , v , v , v ب tronov, nortlonov w , and g c , × 10 بر للاہم بر باق a x

05–30) bwg c (🐴 30–60) g g c . (🔺 60-150) (Bro! ! 2019 🖓 r " r 2018)

RESULTS

RFs estimated from LFA, LGA, and HGA

"ul (gur 🐴) To 🕼 Crof с г | Гх о ро гочдоч хр г (,ро ,. сслг с., 952 09) ун ! З°×З° с с г юр г ун , ю Г., рт ,. о о Г 99 (11×9 g org full will) or 54 (6×9 g org orlrl (الأليد الم 2007)

یمانہ coco یہ סوج تیاا کر 1 o (200−20) ہے؟ o ہا! کر o ob(o یہ ع J,, o ♥ g ♥o,, o (gu 1,) i ‼ 244 co یہ סود ایرا تد ایت آس (89.8) 219 ≭ 100 تد یہ م

o c, x b , g C , J II. o 🐴 🐴 Ar, cl. (gur 1, Tol 1 uppor g δr ο)

or c x_{1} x_{2} x_{3} x_{4} $a_{\rm o}$ $b_{\rm c}$ 81 coo c $(1. n_{\rm o} -41)$ $(2. n_{\rm o} -29)$ 3. n_{ω} _c = 11)

છા 2ાં ગ્રામ્ય અંગ ગ્રામ્ય સં ϖ so (4 4 F_{2160} - 22 042 P - 3 506 × 10 ⁹) $(24^{\circ} 02^{\circ})$ with $g [c] u = 10^{\circ}$ $(24^{\circ} 02^{\circ})$ with $g = 10^{\circ}$ $(33^{\circ} 02^{\circ})$ $(33^$ -1.0 = 1.0o "gic "fir c w "bu i w " o $_{\text{reg}}$ 1 c $_{\text{reg}}$ 11 c $_{\text{reg}}$ 10 b $_{\text{reg}}$ $_{\text{reg}}$ P=0.153) or **polic** g! ($F_{2.160}=0.954$ P=0.387) Aloug 3°×3°c crhor , ulu, xyr ب المان or با oo با با ar for په 2 wr prfor با co pp gyroc vr w $\int d\omega \mathbf{b} \, \mathbf{c}_{\mathcal{A}}(n_{\mathbf{ro}} - c - 17) \, \mathbf{v}_{\mathcal{A}} \, \mathbf{g} \, \mathbf{1}^{\circ} \mathbf{X} \, \mathbf{1}^{\circ} \, \mathbf{c} \, \mathbf{c} \, \mathbf{r} \, \mathbf{k} \, \mathbf{p} \, \mathbf{r}$ 1°×1° אָיָ g gự 1B) טע אייע א 2) $o_{,,g}$ [c r c o [] c $w_{,u}$ by $(F_{2,32}-0.415)$ P-0.664) T $w_{,u}$ of $w_{,u}$ ($F_{2,32}-0.415$ $\mu_{,u}$ g [c $w_{,u}$ ($w_{,u}$ v, $w_{,u}$ ($w_{,u}$ v, $w_{,u}$) $h_{,u}$ g [c $w_{,u}$ v, $w_{,u}$ ($w_{,u}$ v, $w_{,u}$) $h_{,u}$ ($w_{,u}$ v, gic firc. P=0031 به (س, یہ oc یہ of lo "gic firc vuv×koyo) ogic fic rcowrbu rccrc.(vuv... $F_{1,16} = 0.097 P = 0.759 P = 0.759 P = 0.759 P = 0.721$





RF estimated from spiking activity

فَتَنْجُبُ مَسِيَّةٍ **(1** مَسَاتَكَ، 55 الم. 10 مَسَاتَكُ، مَسَيَّةٍ (1 مَسَاتَكَ، مَسَيَّةٍ (1 مَسَاتَكَ) مَ



سااند, بہ اس بی موجب یہ اند, ۱۰ میں میں موجب میں موجب یہ موجب یہ موجب میں م ۱۰ موجود میں ۲ ماد علی میں موجب کا ۲ میں م ۱۰ موجود کا ۲ میں موجب کا ۲ میں م

or col 14 a llar po a roor gaw a bco., fo g c () A A (g g r 3B), br f g r or g)br.ubc/469 rg... 0 005° cc rc of $100 43^{\circ}$ δr μoc^β659 rg., o[↑]06° cc r c _o Г С • 0 6 2° ۱ منه معرفه م g U من کم g I - Ile 1 บ ₩ C بر بر الد 909v! o С بر لابد بد لا**۲ ۳ ۲ (2019) ب**ر c v 1 بر v او بر o f بر g ءا بہ сс г с " b o î 0 1°-1 5° (В) " ! р г с 1984 איז (1981 ע 2002) T י סי a a u 1 rg rll<u>a</u> g с v 1 0 ...

(... ۲۰۰۰ ۲۰۰۰ الد س م⊈يہ o ا⊐ا โบเเเบ 5 ۷۰/۱۰ پېږلېکې (سا ™5 پې 0 پې اوون) و نیس رس کی در . ۲ β یا g C م. ۳ • (F_{2 26}−10 438 P−4 701×10 ⁴ r • ۲ • ۵۵ • ۵۲ (۲۰۰۰ • ۵۰ • ۵۰ • ۵۰ • ۲۰ x_{1} x_{2} y_{1} z_{2} z_{3} z_{4} z_{7} z_{7} z_{1} z_{1 vs ປອງອດr g ຽr ດ) ດູມg ໂ ເ ມີ r ເ ຟ ມ ຽນ به gg ش. س. الله ⊐ير (P>01) T يف gg in i , C D D F 99FOX Du -4 -4 **b**...

Temporal relationships

40 . l o of o o g c . 2005 . 2008) بىبە, 0 ¢ 10 C 3 wrbr ا⊮ فايديد 0 ا⊐ا00 یر تا ت D Q (РТ)об, р g с 🔍 w br --4 ഹി 🔺 o b., 1°×1° c c rhor yr " с **ែ**ល ហ , cròr 14 , ullar, so , cror g... ید کا o بہ co∬ co o ∫ rio بہہ o ت 4., ,egoľ∦,≱orrlo,,(

🔺 🔉 🛛 🗤

MATERIALS AND METHODS

Human subjects

All U with C, a with a set of trugt and trugt of the set of the s

Stereo-electrodes

Macro-micro electrodes

Electrode localization and selection

ا ماس م م م م م م م م م م م م م م م م م

Experimental procedure

Experiment 1: RF mapping using macro-contacts and $3^{\circ} \times 3^{\circ}$ checkerboard stimuli

Experiment 2: RF mapping using macro-contacts and $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ checkerboard stimuli

Experiment 3: RF mapping using microwires and $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ checkerboard stimuli

₿659) 🗴 🕻 c y 469⁴) بر c ه لا م 469 19 C 3 ♥♥ g♥oc vr (T to! 1 upper g for o) T 2 To o b اg بہ tîc ,∡gl یہ صبح بے ا≰ان ا≰ co پر b c کھر بے ا g بے ت ا ت (2 אין 10 c 2 469 ל 10 c 1659 T מאר אין אין 16 אין 2 אין 10 c 1659 T מאר אין אין 10 אין 10 אין 10 אין 10 אין 10 of 10−15 ي.ب. o ميبيد of 10−15 ي.ب. o γγιατυμός είγει γγιαγομοιγεευ) μ Not of of of the within the second of the within the second of the secon sch v, g , c r 1 2 x

Electrophysiological recording via macro-contacts

Electrophysiological recording via microwires

Cowfing lawfront of a log of 32 $v_{,x} g = T$ $v_{,0} o b g_{,x} a_{,x} (v_{,1} b c - 1)$ cor g o $v_{,y} a_{,x} v_{,y} (v_{,1} b c - 1) (v_{,x} c - 1)$ $c_{,0} c$ $v_{,y} v_{,x} v_{,x} v_{,x} (v_{,1} c - 1) (v_{,x} c - 1))$ $e_{,x} v_{,x} v_{,x} v_{,x} v_{,x} c - 1 (v_{,x} c - 1))$ $e_{,x} v_{,x} v_{,x} v_{,x} c - 1 (v_{,x} c - 1))$ $v_{,x} c - 1 (v_{,x} c - 1) (v_{,x} c - 1) (v_{,x} c - 1))$ $v_{,x} c - 1 (v_{,x} c - 1) (v_{,x} c - 1) (v_{,x} c - 1))$ $v_{,x} c - 1 (v_{,x} c - 1) (v_{,x} c - 1) (v_{,x} c - 1))$ $v_{,x} c - 1 (v_{,x} c - 1) (v_{,x} c - 1) (v_{,x} c - 1)$ $v_{,x} c - 1 (v_{,x} c - 1) (v_{,x} c - 1) (v_{,x} c - 1))$ $v_{,x} c - 1 (v_{,x} c - 1) (v_{,x} c - 1) (v_{,x} c - 1) (v_{,x} c - 1))$ $v_{,x} c - 1 (v_{,x} c - 1) (v_{,x} c - 1) (v_{,x} c - 1) (v_{,x} c - 1) (v_{,x} c - 1)$ $v_{,x} c - 1 (v_{,x} c - 1) (v_{,x$

Preprocessing of macro-contact signals

Preprocessing of microwire signals

LFPs

الإ بيان منه منها و بي عامل منها و بي عامل منها منها منها منها و عامل منها و عامل منها و عامل منها و عامل منها و منها علي منها علي منها و عامل منها و عام منها عليها منها منها و عامل منها و عامل منها و عامل منها منها منها منها منها منها و عامل منها و عامل منها و عامل

Spiking activity

100 o 800 به ۲ بی ۵ بالا بی ۲ مانی ۵۵ م 100 م ویرن ۵۰ بی می مایی g o o r **۱۹ و و g i** o o ی g بی i o w w i o w w i o w w i o w w i o w w

Identification of visually responsive macro-contacts and units

سب به موقع تصنی از است مسب سع وو س عس موقع چو علی موقع چو ما ع س موقع س موجعیاا لاست س

Estimation of the location and size of RFs

- for the form c for the form c form
- 28 عبره تې او بر مې توماند بر ۲ 5696-5709
- Agu rr B o B B B r Agurr (2014) prrcoou "oro II ryr, o of orci, uric by a r coof Poor B 100 1003538
- 783 5 Bl , I
- o ب o ب 21 ب 1185–1195

- 30 13739–13749 Bu بُمَ r gu ⊸ (2004) بده اعدال من محتال c c 304 1926–1929

- , u loor c l r r c ... uro .c 33 1228-1240

- u oul II B¹A (2008) Royulor cy II ,.
- υ μίος κυτο g 39 647–660 g μ Δ δ ς μ μ Β Δ (1997) ο οφος σς ο υ μίος κ μ μφος κοιδύος ο μ το ρεκτ7 181–192
- r B g r (2021) ο μ 1 γυτ ΙΓΙγο μγκο Ι δτ ο κουμυμος ο μ για σοδηρισ Bol .c г В 4 1-3
- сIВ 11055
- o "r Bgr τ Β gr rr β^er (2015) r_γ, c_γ, c_γ
- 0...7 μοίζει το γγια Τι το τουμία το τουμάτιο του ματικού του του ματικού του του Βι αυτοριματικού του του ματικού το
- 0⁰0⁰ (2021) ο μο μο τδο μ σg cc μο 1 μg μτο το το μο ο ο το μ. α с,
- C 64 847-860 Co. (1981) Joyog , of 2
- cυρ, υτο 201519-539 Γ ΤΙΑ (2008) ρ, το οί, Ι g ο

ا ocrcrµ, بې gc س وولا اکا crcrw, ا وولا د bcllyo

- 6 27819 $\begin{array}{c} 819 \\ g T 0 g 0 0 0 0 \\ (2021) v] \mathbf{y}] g \\ \mathbf{y} \\ \mathbf{y}$ o y r_____lor z Po Boll9 3001466 ĥť
- یہ ۲ ofg ير و العرو یہ ۲

- مت ت ت ت ب 148 5/4–591 Bo õ ت ب ال T T ب g l² (2015) ب ت ال مت د ب مال ک ب آ آ ک ب ت ت ت ت و ت ال 2015) ب عام 38 ب ع م مال ب ب g T ب م مال ب ت ت ت ت ت ت ت ت ت ت ت ت ت ت ت ت ت
- 192 194
- in roulo ou l (2017) , υ ε sec. μίντμοίε οφεί. γμ. μο μ Τ μμαμοί Β. ρετμιγείτη ρειντι gr 3-22 olou ogo
- (2019)اً من بريد الله في الدي الله المراحة ا **★**c c **★** 116 6425–6434

- yor lor t wro 49 433-445 t_{0} lor t_{0} t_{0} T g
- son 19 439–452 ير مت ير برا وبرا تد 19 439–452 عر مت

- vo.c 39 333-352

- or t c c 368 c 3313
- u libr int int int interest in the second se l c (2005) ע סר ע
- cor x c c 309 951–954 U I r O r I r I

مبرای بر ک* (2020) ا T آ∘مبرا م و و و مراد مراد (2020) م و مراد م بر مایربریان بر م در م در م و و م را سر بر م در و ی م o , 1 vro 105 180–197 5

g 11 046007

gr r, b yo o, Br, oyill gr r, b c (2019) vriccobr yr col. o fuloulo of 1 fr g g o, cllo, 18 ٢ 42101

 $f = \frac{42101}{10}$ from the rest of the r

r yo ا y lc o ا crowr wg y ا vro 28 11526-11536

с., с. ". loor к ро Во 19 1000610

g c , c v , loc x fo Boty 100000 , v , ll (2011a) אור ר , ll c r l o , y t w , rggr b c l l אo l l c o loo c , vro, c

Ir , B Icr (2002) г I c с с х I г с о , с U у г , J cor с U г о 36 739–750 Т I В II о , г Г , д (2011) В , or

879716

rorl T l g o B r l , A foor r Tog , o l l f (2014) g o c l o c r c r f c c l or r roc , g o , a l c r f o c l c c 🔺 111 14332-14341

ت يو ا ژا تد (2007) B 🗤 🐴 ∥B⁺A vovl or ≠ vro 56 366–383

B 106 473-502

2302

ол ол ТР г г јл – А. (2012 Јол улбум "Ф Росј Гјуо јл "Ф g u (2012)

ou B ρ , a with (2019) if c g uto 1 a case is graved by the second second