

Continuous Bimanual Trajectory Decoding of Coordinated Movement from EEG Signals (supporting document)

Yi-Feng Chen, *Member, IEEE*, Ruiqi Fu, Junde Wu, Jongbin Song, Rui Ma, Yi-chuan Jiang, *Graduate Student Member, IEEE*, and Mingming Zhang, *Senior Member, IEEE*

I. EXPERIMENT AND RESULTS

A. *Experimental Paradigm*

Four videos have been presented as Supplementary Movie_S1, Supplementary Movie_S2, Supplementary Movie_S3, and Supplementary Movie_S4, respectively. In Supplementary Movie_S1, we show how to control the moving of circles on the monitor by moving the real hands. The velocity and position of real hands are tracked by the Leap Motion device and used to update the position of the circles. Supplementary Movie_S2, Supplementary Movie_S3, and Supplementary Movie_S4 show bimanual movement tasks, left-hand movement tasks, and right-hand movement tasks in the experiment. In these three videos, we show how to control the movement of circles by moving the real hands to reach targets.

B. *Experiment Results*

The correlation coefficient (CC) and normalized root mean square error (NRMSE) after 10-fold cross-validation on each subject were calculated for both bimanual session (both-hands movement) and unimanual session (left- and right-hand movement). The results of all 13 subjects were presented in Tables SI and SII.

TABLE SI

THE CORRELATION COEFFICIENT (CC) BETWEEN THE RECORDED TRAJECTORIES (POSITION AND VELOCITY) AND THE DECODED ONES BY DIFFERENT MODELS DURING BIMANUAL AND UNIMANUAL MOVEMENTS. ALL RESULTS WERE CONDUCTED USING 10-FOLD CROSS-VALIDATION. SUBJECT 1 – SUBJECT 6

Subject	Models	Bimanual						Unimanual			
		Combined both hands		Left hand		Right hand		Left hand		Right hand	
		Position	Velocity	Position	Velocity	Position	Velocity	Position	Velocity	Position	Velocity
S1	Chance Level	0.10	0.12	0.11±0.07	0.12±0.14	0.09±0.17	0.11±0.18	0.12±0.06	0.13±0.17	0.07±0.12	-0.01±0.12
	DeepConvNet+LSTM	0.45	0.39	0.45±0.17	0.38±0.09	0.44±0.15	0.40±0.10	0.56±0.19	0.52±0.12	0.22±0.17	0.36±0.18
	ShallowConvNet+LSTM	0.53	0.52	0.52±0.11	0.51±0.12	0.54±0.14	0.52±0.12	0.64±0.13	0.47±0.13	0.22±0.07	0.18±0.09
	DeepConvNet	-0.31	-0.46	-0.38±0.33	-0.49±0.24	-0.23±0.29	-0.42±0.24	0.23±0.36	0.26±0.35	0.21±0.34	0.04±0.35
	ShallowConvNet	0.31	0.29	0.31±0.20	0.27±0.19	0.30±0.21	0.30±0.18	0.24±0.48	0.48±0.27	-0.22±0.32	-0.12±0.34
	EEGNet	0.33	0.28	0.32±0.25	0.26±0.24	0.33±0.28	0.29±0.24	0.40±0.23	0.40±0.24	-0.28±0.30	-0.15±0.30
S2	Proposed Method	0.54	0.50	0.54±0.10	0.50±0.13	0.54±0.10	0.50±0.11	0.48±0.14	0.64±0.14	0.28±0.03	0.33±0.13
	Chance Level	0.28	-0.03	0.17±0.26	-0.13±0.17	0.22±0.26	0.07±0.23	0.09±0.06	-0.08±0.17	0.11±0.17	0.08±0.20
	DeepConvNet+LSTM	0.43	0.20	0.45±0.11	0.22±0.10	0.40±0.17	0.17±0.11	0.34±0.21	0.33±0.20	0.45±0.16	0.44±0.12
	ShallowConvNet+LSTM	0.60	0.36	0.63±0.19	0.46±0.19	0.56±0.17	0.25±0.16	0.22±0.23	0.41±0.23	0.43±0.14	0.52±0.08
	DeepConvNet	0.31	0.1	0.32±0.43	0.16±0.30	0.29±0.42	0.04±0.28	0.31±0.24	0.32±0.24	0.18±0.40	0.2±0.39
	ShallowConvNet	0.46	0.23	0.47±0.41	0.3±0.36	0.44±0.46	0.16±0.34	0.36±0.19	0.34±0.18	0.25±0.32	0.24±0.38
S3	EEGNet	0.54	0.14	0.59±0.29	0.20±0.29	0.48±0.23	0.08±0.35	-0.15±0.26	-0.16±0.25	0.10±0.39	0.08±0.43
	Proposed Method	0.65	0.40	0.72±0.13	0.51±0.19	0.58±0.14	0.29±0.09	0.42±0.22	0.21±0.02	0.52±0.14	0.48±0.13
	Chance Level	-0.03	-0.02	-0.02±0.05	-0.04±0.06	-0.03±0.05	0.01±0.01	0.12±0.09	0.03±0.09	0.16±0.10	-0.03±0.19
	DeepConvNet+LSTM	0.35	0.30	0.35±0.13	0.31±0.12	0.35±0.12	0.28±0.11	0.35±0.10	0.24±0.13	0.55±0.10	0.35±0.12
	ShallowConvNet+LSTM	0.37	0.35	0.34±0.14	0.36±0.17	0.39±0.15	0.34±0.16	0.42±0.10	0.30±0.09	0.57±0.11	0.37±0.15
	DeepConvNet	-0.10	-0.08	-0.08±0.23	-0.09±0.21	-0.06±0.22	-0.07±0.21	0.18±0.20	0.17±0.20	0.43±0.16	0.25±0.19
S4	ShallowConvNet	0.02	0.06	0.01±0.22	0.06±0.19	0.03±0.25	0.06±0.19	0.17±0.23	0.18±0.18	0.53±0.17	0.33±0.19
	EEGNet	0.08	0.05	0.07±0.18	0.06±0.14	0.08±0.20	0.04±0.16	0.21±0.22	0.22±0.23	0.54±0.17	0.36±0.19
	Proposed Method	0.37	0.35	0.35±0.13	0.36±0.13	0.39±0.09	0.34±0.08	0.42±0.07	0.30±0.10	0.57±0.10	0.36±0.08
	Chance Level	0.08	0.04	0.11±0.09	0.02±0.13	0.05±0.14	0.05±0.10	0.10±0.18	0.04±0.18	-0.10±0.13	0.09±0.10
	DeepConvNet+LSTM	0.45	0.33	0.43±0.13	0.35±0.16	0.47±0.13	0.30±0.13	0.56±0.10	0.32±0.10	0.40±0.15	0.32±0.18
	ShallowConvNet+LSTM	0.46	0.30	0.48±0.19	0.30±0.17	0.44±0.11	0.29±0.11	0.54±0.11	0.34±0.15	0.42±0.08	0.23±0.08
S5	DeepConvNet	0.29	0.15	0.29±0.30	0.15±0.29	0.28±0.33	0.14±0.25	0.2±0.34	0.23±0.29	0.07±0.29	0.04±0.35
	ShallowConvNet	0.24	0.10	0.23±0.31	0.14±0.23	0.25±0.31	0.05±0.22	0.36±0.27	0.25±0.22	0.17±0.23	0.14±0.29
	EEGNet	0.23	0.10	0.24±0.19	0.10±0.19	0.21±0.17	0.10±0.14	0.29±0.16	0.18±0.17	0.13±0.17	-0.01±0.26
	Proposed Method	0.51	0.38	0.51±0.12	0.39±0.17	0.51±0.12	0.36±0.17	0.34±0.05	0.39±0.10	0.39±0.09	0.19±0.08
	Chance Level	0.07	0.05	0.12±0.18	0.04±0.16	0.01±0.15	0.05±0.16	-0.01±0.11	-0.01±0.08	-0.06±0.02	0.01±0.01
	DeepConvNet+LSTM	0.42	0.25	0.44±0.12	0.23±0.13	0.40±0.19	0.26±0.13	0.43±0.10	0.43±0.12	0.31±0.09	0.34±0.17
S6	ShallowConvNet+LSTM	0.43	0.28	0.44±0.15	0.26±0.12	0.41±0.15	0.29±0.13	0.52±0.14	0.34±0.14	0.47±0.09	0.35±0.13
	DeepConvNet	0.13	0.11	0.15±0.27	0.11±0.26	0.11±0.28	0.1±0.24	0.17±0.31	0.17±0.30	0.09±0.25	0.15±0.24
	ShallowConvNet	0.20	0.16	0.20±0.28	0.16±0.21	0.20±0.28	0.16±0.21	0.27±0.21	0.28±0.23	0.22±0.30	0.25±0.25
	EEGNet	0.12	0.05	0.12±0.05	0.04±0.02	0.11±0.04	0.05±0.02	0.35±0.13	0.35±0.13	0.17±0.16	0.26±0.14
	Proposed Method	0.47	0.38	0.49±0.14	0.36±0.10	0.45±0.13	0.39±0.11	0.45±0.11	0.49±0.10	0.44±0.08	0.47±0.17
	Chance Level	0.09	0.10	0.14±0.11	0.08±0.14	0.04±0.13	0.11±0.17	0.02±0.16	0.09±0.16	0.17±0.06	0.09±0.05
S6	DeepConvNet+LSTM	0.39	0.34	0.58±0.01	0.41±0.12	0.20±0.11	0.27±0.12	0.37±0.09	-0.05±0.09	0.46±0.16	0.39±0.12
	ShallowConvNet+LSTM	0.55	0.35	0.71±0.19	0.38±0.18	0.38±0.14	0.31±0.17	0.31±0.08	0.25±0.13	0.45±0.12	0.35±0.28
	DeepConvNet	0.13	0.10	0.22±0.38	0.07±0.40	0.04±0.42	0.12±0.12	-0.10±0.20	-0.16±0.25	0.36±0.26	0.31±0.23
	ShallowConvNet	0.30	0.23	0.39±0.44	0.18±0.47	0.21±0.47	0.27±0.29	0.06±0.26	0.12±0.19	0.4±0.34	0.26±0.41
	EEGNet	0.27	0.24	0.32±0.11	0.17±0.09	0.21±0.11	0.31±0.13	0.03±0.05	-0.13±0.14	0.40±0.16	0.23±0.17
	Proposed Method	0.58	0.48	0.70±0.14	0.44±0.11	0.46±0.13	0.51±0.12	0.29±0.01	0.13±0.03	0.46±0.13	0.41±0.12

TABLE SI

(CONTINUED) THE CORRELATION COEFFICIENT (CC) BETWEEN THE RECORDED TRAJECTORIES (POSITION AND VELOCITY) AND THE DECODED ONES BY DIFFERENT MODELS DURING BIMANUAL AND UNIMANUAL MOVEMENTS. ALL RESULTS WERE CONDUCTED USING 10-FOLD CROSS-VALIDATION. SUBJECT 7 – SUBJECT 13

Subject	Models	Bimanual						Unimanual			
		Combined both hands		Left hand		Right hand		Left hand		Right hand	
		Position	Velocity	Position	Velocity	Position	Velocity	Position	Velocity	Position	Velocity
S7	Chance Level	0.13	-0.04	0.12±0.12	-0.04±0.17	0.14±0.17	-0.03±0.18	0.08±0.05	-0.01±0.08	0.09±0.17	0.01±0.16
	DeepConvNet+LSTM	0.57	0.48	0.59±0.15	0.51±0.16	0.54±0.15	0.45±0.14	0.48±0.14	0.43±0.11	0.34±0.17	0.32±0.18
	ShallowConvNet+LSTM	0.69	0.58	0.72±0.17	0.59±0.15	0.66±0.16	0.57±0.12	0.61±0.12	0.21±0.12	0.25±0.13	0.27±0.17
	DeepConvNet	0.33	0.26	0.36±0.21	0.25±0.11	0.30±0.12	0.26±0.10	0.25±0.19	0.28±0.16	0.04±0.17	0.01±0.19
	ShallowConvNet	0.39	0.28	0.42±0.22	0.30±0.14	0.35±0.17	0.25±0.10	0.22±0.17	0.15±0.13	0.08±0.19	0.11±0.18
	EEGNet	0.50	0.30	0.50±0.10	0.30±0.13	0.49±0.19	0.30±0.13	0.34±0.10	0.33±0.19	-0.07±0.09	-0.07±0.04
	Proposed Method	0.71	0.61	0.71±0.08	0.60±0.09	0.70±0.08	0.61±0.09	0.24±0.06	0.49±0.06	0.26±0.11	0.16±0.09
S8	Chance Level	0.06	0.01	0.09±0.11	0.01±0.04	0.02±0.03	0.01±0.06	0.02±0.02	0.02±0.05	0.02±0.03	-0.03±0.01
	DeepConvNet+LSTM	0.33	0.28	0.32±0.10	0.28±0.12	0.33±0.17	0.28±0.18	0.30±0.17	0.25±0.18	0.10±0.07	0.10±0.06
	ShallowConvNet+LSTM	0.31	0.29	0.32±0.13	0.29±0.13	0.30±0.15	0.28±0.12	0.30±0.19	0.27±0.19	0.12±0.06	0.11±0.16
	DeepConvNet	0.04	0.05	0.06±0.17	0.06±0.15	0.02±0.19	0.03±0.17	0.2±0.13	0.16±0.11	0.11±0.18	0.13±0.19
	ShallowConvNet	0.09	0.07	0.12±0.16	0.08±0.13	0.06±0.18	0.05±0.13	0.25±0.13	0.2±0.15	0.11±0.14	0.11±0.18
	EEGNet	0.14	0.13	0.15±0.13	0.13±0.08	0.13±0.15	0.12±0.12	0.26±0.19	0.23±0.16	0.03±0.13	0.08±0.14
	Proposed Method	0.35	0.33	0.35±0.09	0.32±0.11	0.35±0.13	0.33±0.09	0.35±0.16	0.30±0.06	0.24±0.08	0.29±0.08
S9	Chance Level	0.07	0.06	0.11±0.16	0.14±0.25	0.03±0.19	-0.02±0.20	-0.05±0.22	-0.06±0.26	-0.18±0.24	-0.04±0.22
	DeepConvNet+LSTM	0.37	0.30	0.45±0.13	0.30±0.20	0.29±0.23	0.30±0.23	0.36±0.25	0.40±0.24	0.36±0.15	0.31±0.14
	ShallowConvNet+LSTM	0.42	0.30	0.49±0.12	0.40±0.18	0.34±0.22	0.20±0.21	0.42±0.20	0.43±0.18	0.38±0.16	0.31±0.15
	DeepConvNet	0.14	0.17	0.20±0.28	0.20±0.27	0.07±0.18	0.14±0.11	0.31±0.21	0.32±0.20	0.22±0.28	0.24±0.17
	ShallowConvNet	0.15	0.16	0.19±0.28	0.14±0.30	0.1±0.22	0.18±0.26	0.34±0.18	0.32±0.17	0.21±0.24	0.27±0.17
	EEGNet	0.19	0.17	0.26±0.26	0.16±0.19	0.12±0.11	0.18±0.16	0.38±0.21	0.32±0.24	0.21±0.24	0.13±0.25
	Proposed Method	0.51	0.47	0.58±0.11	0.54±0.11	0.43±0.24	0.39±0.21	0.49±0.11	0.48±0.14	0.41±0.07	0.36±0.13
S10	Chance Level	0.06	0.02	0.05±0.17	-0.05±0.20	0.07±0.11	0.09±0.21	0.03±0.12	0.03±0.25	0.06±0.13	0.15±0.03
	DeepConvNet+LSTM	0.4	0.26	0.44±0.15	0.31±0.17	0.36±0.15	0.20±0.27	0.38±0.29	0.32±0.24	0.24±0.13	0.29±0.08
	ShallowConvNet+LSTM	0.42	0.27	0.45±0.12	0.28±0.25	0.39±0.16	0.26±0.21	0.42±0.24	0.32±0.22	0.29±0.04	0.3±0.04
	DeepConvNet	0.22	0.16	0.21±0.28	0.16±0.21	0.23±0.28	0.15±0.25	0.31±0.24	0.27±0.26	0.28±0.15	0.32±0.12
	ShallowConvNet	0.20	0.14	0.15±0.21	0.11±0.17	0.25±0.24	0.16±0.26	0.4±0.15	0.12±0.22	0.27±0.09	0.32±0.18
	EEGNet	0.20	0.10	0.22±0.25	0.14±0.22	0.18±0.27	0.05±0.26	0.27±0.23	0.16±0.28	0.27±0.13	0.27±0.06
	Proposed Method	0.51	0.35	0.5±0.09	0.35±0.14	0.51±0.16	0.35±0.09	0.44±0.23	0.3±0.20	0.41±0.06	0.33±0.08
S11	Chance Level	0.03	0.01	0.06±0.19	0.00±0.18	0.00±0.17	0.01±0.20	-0.03±0.23	-0.06±0.16	0.01±0.15	0.05±0.17
	DeepConvNet+LSTM	0.5	0.32	0.5±0.16	0.33±0.17	0.5±0.12	0.3±0.15	0.24±0.19	0.16±0.20	0.23±0.19	0.23±0.17
	ShallowConvNet+LSTM	0.53	0.37	0.52±0.17	0.33±0.18	0.53±0.22	0.4±0.19	0.23±0.18	0.16±0.12	0.38±0.21	0.26±0.23
	DeepConvNet	0.19	0.08	0.21±0.17	0.08±0.27	0.16±0.19	0.08±0.23	0.19±0.19	0.17±0.08	0.1±0.21	0.15±0.20
	ShallowConvNet	0.41	0.23	0.42±0.14	0.27±0.23	0.39±0.19	0.18±0.19	0.18±0.19	0.12±0.21	0.11±0.16	0.10±0.19
	EEGNet	0.45	0.20	0.44±0.19	0.19±0.25	0.45±0.21	0.2±0.10	0.26±0.20	0.2±0.20	0.16±0.15	0.21±0.20
	Proposed Method	0.59	0.42	0.64±0.09	0.46±0.08	0.54±0.22	0.37±0.14	0.35±0.14	0.26±0.16	0.30±0.11	0.31±0.13
S12	Chance Level	0.21	0.19	0.22±0.18	0.18±0.16	0.2±0.17	0.19±0.18	0.03±0.17	0.01±0.23	0.11±0.19	0.06±0.17
	DeepConvNet+LSTM	0.65	0.47	0.65±0.11	0.42±0.15	0.64±0.12	0.51±0.15	0.33±0.22	0.22±0.21	0.2±0.20	0.18±0.26
	ShallowConvNet+LSTM	0.68	0.47	0.67±0.12	0.4±0.18	0.68±0.11	0.54±0.17	0.33±0.14	0.27±0.19	0.35±0.18	0.32±0.21
	DeepConvNet	0.60	0.40	0.59±0.15	0.33±0.17	0.61±0.13	0.46±0.14	0.32±0.11	0.24±0.14	0.14±0.18	0.12±0.16
	ShallowConvNet	0.65	0.44	0.65±0.12	0.37±0.16	0.65±0.12	0.51±0.16	0.21±0.10	0.18±0.24	0.31±0.16	0.26±0.18
	EEGNet	0.56	0.34	0.53±0.20	0.27±0.25	0.58±0.18	0.41±0.20	0.18±0.18	0.16±0.23	0.14±0.10	0.08±0.21
	Proposed Method	0.69	0.53	0.68±0.09	0.52±0.08	0.69±0.08	0.54±0.08	0.35±0.18	0.40±0.25	0.44±0.12	0.42±0.13
S13	Chance Level	0.06	-0.07	-0.01±0.20	-0.06±0.21	0.13±0.12	-0.07±0.19	-0.03±0.17	-0.07±0.18	-0.04±0.11	0.09±0.13
	DeepConvNet+LSTM	0.40	0.29	0.42±0.08	0.34±0.13	0.37±0.12	0.23±0.16	0.37±0.12	0.36±0.16	0.24±0.12	0.22±0.12
	ShallowConvNet+LSTM	0.46	0.30	0.47±0.16	0.31±0.12	0.44±0.17	0.28±0.21	0.41±0.15	0.38±0.14	0.27±0.08	0.25±0.09
	DeepConvNet	0.23	0.10	0.26±0.17	0.16±0.11	0.2±0.18	0.04±0.17	0.25±0.16	0.2±0.17	0.31±0.15	0.24±0.13
	ShallowConvNet	0.35	0.20	0.44±0.13	0.19±0.16	0.25±0.19	0.21±0.22	0.23±0.19	0.25±0.16	0.26±0.15	0.24±0.16
	EEGNet	0.23	0.19	0.26±0.17	0.18±0.18	0.19±0.23	0.19±0.28	0.23±0.25	0.22±0.25	0.17±0.06	0.12±0.08
	Proposed Method	0.48	0.29	0.49±0.16	0.27±0.24	0.46±0.24	0.31±0.24	0.43±0.12	0.43±0.12	0.36±0.15	0.37±0.16

TABLE SII

THE NORMALIZED ROOT MEAN SQUARE ERROR (NRMSE) BETWEEN THE RECORDED TRAJECTORIES (POSITION AND VELOCITY) AND THE DECODED ONES BY DIFFERENT MODELS DURING BIMANUAL AND UNIMANUAL MOVEMENTS. ALL RESULTS WERE CONDUCTED USING 10-FOLD CROSS-VALIDATION.
SUBJECT 1 – SUBJECT 8

Subject	Models	Bimanual						Unimanual			
		Combined both hands		Left hand		Right hand		Left hand		Right hand	
		Position	Velocity	Position	Velocity	Position	Velocity	Position	Velocity	Position	Velocity
S1	Chance Level	0.57	0.50	0.58±0.00	0.49±0.00	0.56±0.01	0.50±0.00	0.51±0.00	0.50±0.00	0.61±0.00	0.55±0.00
	DeepConvNet+LSTM	0.37	0.32	0.37±0.04	0.31±0.04	0.37±0.04	0.33±0.04	0.27±0.08	0.29±0.09	0.43±0.05	0.38±0.07
	ShallowConvNet+LSTM	0.28	0.30	0.30±0.03	0.30±0.05	0.26±0.03	0.29±0.05	0.26±0.02	0.29±0.03	0.31±0.04	0.34±0.02
	DeepConvNet	0.61	0.57	0.61±0.15	0.58±0.23	0.60±0.19	0.55±0.09	0.50±0.18	0.42±0.15	0.60±0.30	0.49±0.14
	ShallowConvNet	0.44	0.37	0.44±0.10	0.37±0.08	0.43±0.09	0.37±0.07	0.45±0.17	0.40±0.17	0.50±0.17	0.45±0.18
	EEGNet	0.35	0.32	0.35±0.04	0.32±0.04	0.34±0.04	0.32±0.04	0.29±0.06	0.27±0.06	0.36±0.01	0.35±0.03
	Proposed Method	0.23	0.27	0.23±0.04	0.26±0.03	0.23±0.04	0.27±0.03	0.25±0.07	0.26±0.07	0.29±0.04	0.28±0.04
S2	Chance Level	0.40	0.40	0.44±0.00	0.40±0.00	0.35±0.00	0.39±0.00	0.64±0.00	0.63±0.00	0.58±0.00	0.64±0.00
	DeepConvNet+LSTM	0.30	0.32	0.30±0.09	0.33±0.07	0.29±0.10	0.31±0.08	0.34±0.05	0.37±0.05	0.31±0.03	0.39±0.04
	ShallowConvNet+LSTM	0.29	0.34	0.28±0.09	0.34±0.11	0.29±0.09	0.33±0.08	0.30±0.06	0.32±0.04	0.30±0.08	0.35±0.04
	DeepConvNet	0.47	0.52	0.44±0.15	0.53±0.21	0.50±0.23	0.50±0.17	0.44±0.12	0.46±0.10	0.40±0.24	0.47±0.22
	ShallowConvNet	0.44	0.45	0.43±0.17	0.45±0.12	0.44±0.14	0.44±0.16	0.61±0.08	0.65±0.08	0.48±0.24	0.54±0.18
	EEGNet	0.29	0.39	0.28±0.06	0.40±0.13	0.29±0.08	0.37±0.04	0.34±0.06	0.36±0.06	0.34±0.02	0.41±0.06
	Proposed Method	0.18	0.18	0.18±0.07	0.17±0.06	0.18±0.06	0.18±0.06	0.23±0.06	0.29±0.08	0.26±0.09	0.29±0.01
S3	Chance Level	0.55	0.51	0.58±0.00	0.54±0.00	0.51±0.01	0.47±0.00	0.49±0.00	0.46±0.00	0.61±0.00	0.63±0.01
	DeepConvNet+LSTM	0.42	0.39	0.42±0.04	0.40±0.07	0.42±0.03	0.37±0.04	0.35±0.04	0.31±0.05	0.31±0.05	0.33±0.05
	ShallowConvNet+LSTM	0.27	0.24	0.27±0.03	0.23±0.06	0.27±0.03	0.24±0.06	0.30±0.04	0.31±0.03	0.27±0.04	0.30±0.04
	DeepConvNet	0.46	0.41	0.44±0.13	0.41±0.11	0.48±0.18	0.41±0.10	0.42±0.09	0.37±0.13	0.33±0.09	0.31±0.06
	ShallowConvNet	0.46	0.42	0.45±0.12	0.42±0.13	0.46±0.15	0.41±0.10	0.42±0.14	0.38±0.16	0.28±0.05	0.31±0.09
	EEGNet	0.43	0.38	0.43±0.07	0.39±0.08	0.43±0.06	0.37±0.06	0.35±0.04	0.29±0.06	0.26±0.04	0.27±0.04
	Proposed Method	0.22	0.23	0.21±0.03	0.22±0.07	0.23±0.06	0.24±0.05	0.22±0.02	0.26±0.03	0.25±0.04	0.29±0.06
S4	Chance Level	0.55	0.49	0.62±0.01	0.50±0.01	0.48±0.01	0.47±0.01	0.62±0.01	0.49±0.01	0.46±0.01	0.51±0.01
	DeepConvNet+LSTM	0.31	0.29	0.31±0.05	0.28±0.07	0.31±0.06	0.29±0.04	0.30±0.05	0.32±0.08	0.30±0.03	0.33±0.03
	ShallowConvNet+LSTM	0.27	0.27	0.27±0.04	0.27±0.07	0.27±0.06	0.26±0.04	0.29±0.03	0.27±0.06	0.30±0.02	0.31±0.03
	DeepConvNet	0.32	0.32	0.33±0.15	0.33±0.08	0.30±0.12	0.31±0.10	0.35±0.06	0.36±0.10	0.37±0.09	0.41±0.08
	ShallowConvNet	0.34	0.34	0.36±0.13	0.36±0.17	0.31±0.07	0.32±0.08	0.37±0.15	0.45±0.21	0.39±0.17	0.43±0.13
	EEGNet	0.28	0.28	0.27±0.04	0.29±0.08	0.29±0.04	0.26±0.03	0.29±0.04	0.30±0.08	0.28±0.04	0.38±0.06
	Proposed Method	0.25	0.23	0.25±0.06	0.23±0.05	0.25±0.05	0.22±0.03	0.27±0.05	0.27±0.05	0.27±0.03	0.34±0.03
S5	Chance Level	0.63	0.56	0.65±0.00	0.56±0.01	0.61±0.00	0.55±0.00	0.46±0.00	0.45±0.00	0.63±0.00	0.62±0.00
	DeepConvNet+LSTM	0.35	0.37	0.35±0.03	0.36±0.02	0.35±0.03	0.38±0.03	0.31±0.04	0.32±0.06	0.29±0.03	0.19±0.07
	ShallowConvNet+LSTM	0.34	0.36	0.34±0.06	0.35±0.04	0.34±0.02	0.37±0.04	0.30±0.01	0.29±0.07	0.20±0.06	0.20±0.07
	DeepConvNet	0.43	0.46	0.41±0.05	0.46±0.09	0.45±0.09	0.45±0.08	0.49±0.12	0.50±0.10	0.48±0.10	0.43±0.09
	ShallowConvNet	0.42	0.42	0.42±0.06	0.42±0.07	0.41±0.06	0.41±0.08	0.48±0.12	0.46±0.14	0.49±0.11	0.42±0.11
	EEGNet	0.38	0.4	0.38±0.01	0.39±0.04	0.38±0.02	0.40±0.05	0.24±0.01	0.24±0.02	0.21±0.08	0.21±0.07
	Proposed Method	0.26	0.25	0.26±0.04	0.24±0.08	0.26±0.05	0.25±0.04	0.21±0.06	0.21±0.07	0.18±0.05	0.17±0.05
S6	Chance Level	0.52	0.51	0.57±0.01	0.53±0.00	0.46±0.00	0.48±0.00	0.50±0.01	0.40±0.01	0.50±0.01	0.52±0.00
	DeepConvNet+LSTM	0.31	0.37	0.31±0.01	0.39±0.09	0.30±0.06	0.34±0.09	0.30±0.04	0.35±0.07	0.29±0.04	0.29±0.05
	ShallowConvNet+LSTM	0.25	0.28	0.23±0.05	0.29±0.09	0.27±0.06	0.26±0.05	0.28±0.02	0.32±0.05	0.27±0.02	0.27±0.03
	DeepConvNet	0.34	0.38	0.32±0.09	0.41±0.15	0.36±0.12	0.34±0.11	0.42±0.11	0.47±0.14	0.38±0.14	0.42±0.18
	ShallowConvNet	0.33	0.37	0.31±0.12	0.36±0.12	0.34±0.16	0.37±0.17	0.38±0.09	0.40±0.10	0.37±0.18	0.40±0.14
	EEGNet	0.25	0.30	0.24±0.03	0.31±0.01	0.26±0.06	0.28±0.07	0.29±0.06	0.34±0.06	0.26±0.04	0.27±0.04
	Proposed Method	0.13	0.13	0.11±0.05	0.12±0.04	0.14±0.08	0.14±0.07	0.12±0.08	0.13±0.05	0.14±0.02	0.15±0.06
S7	Chance Level	0.52	0.42	0.54±0.00	0.45±0.00	0.50±0.00	0.38±0.00	0.54±0.00	0.48±0.00	0.58±0.00	0.63±0.00
	DeepConvNet+LSTM	0.25	0.28	0.24±0.06	0.27±0.06	0.26±0.05	0.29±0.07	0.28±0.03	0.33±0.01	0.24±0.01	0.28±0.09
	ShallowConvNet+LSTM	0.22	0.26	0.21±0.06	0.26±0.07	0.22±0.05	0.26±0.06	0.23±0.04	0.23±0.05	0.21±0.04	0.21±0.04
	DeepConvNet	0.33	0.36	0.32±0.11	0.34±0.11	0.33±0.09	0.38±0.15	0.35±0.12	0.36±0.10	0.40±0.11	0.45±0.12
	ShallowConvNet	0.32	0.38	0.30±0.11	0.37±0.17	0.34±0.14	0.38±0.13	0.35±0.10	0.43±0.15	0.36±0.08	0.41±0.07
	EEGNet	0.20	0.25	0.20±0.04	0.24±0.04	0.20±0.03	0.26±0.05	0.25±0.04	0.28±0.05	0.25±0.04	0.28±0.05
	Proposed Method	0.16	0.20	0.16±0.04	0.19±0.04	0.15±0.03	0.21±0.04	0.22±0.02	0.22±0.04	0.24±0.04	0.26±0.05
S8	Chance Level	0.57	0.53	0.61±0.00	0.58±0.00	0.52±0.00	0.48±0.00	0.60±0.00	0.59±0.00	0.59±0.00	0.59±0.00
	DeepConvNet+LSTM	0.28	0.31	0.28±0.06	0.33±0.07	0.28±0.06	0.29±0.06	0.29±0.09	0.31±0.04	0.33±0.02	0.29±0.06
	ShallowConvNet+LSTM	0.28	0.28	0.27±0.05	0.28±0.05	0.28±0.04	0.27±0.04	0.27±0.25	0.24±0.07	0.25±0.02	0.24±0.06
	DeepConvNet	0.39	0.40	0.37±0.07	0.36±0.07	0.40±0.11	0.43±0.09	0.47±0.14	0.43±0.12	0.43±0.10	0.44±0.12
	ShallowConvNet	0.38	0.38	0.39±0.09	0.37±0.07	0.37±0.08	0.38±0.09	0.43±0.13	0.41±0.11	0.53±0.08	0.49±0.08
	EEGNet	0.29	0.30	0.29±0.02	0.29±0.03	0.29±0.04	0.30±0.03	0.26±0.03	0.26±0.03	0.24±0.03	0.24±0.04
	Proposed Method	0.25	0.22	0.29±0.12	0.21±0.03	0.21±0.04	0.22±0.04	0.22±0.03	0.24±0.05	0.22±0.07	0.25±0.01

TABLE SII

(CONTINUED) THE NORMALIZED ROOT MEAN SQUARE ERROR (NRMSE) BETWEEN THE RECORDED TRAJECTORIES (POSITION AND VELOCITY) AND THE DECODED ONES BY DIFFERENT MODELS DURING BIMANUAL AND UNIMANUAL MOVEMENTS. ALL RESULTS WERE CONDUCTED USING 10-FOLD CROSS-VALIDATION. SUBJECT 9 – SUBJECT 13

Subject	Models	Bimanual						Unimanual			
		Combined both hands		Left hand		Right hand		Left hand		Right hand	
		Position	Velocity	Position	Velocity	Position	Velocity	Position	Velocity	Position	Velocity
S9	Chance Level	0.31	0.33	0.75±0.00	0.70±0.00	0.70±0.00	0.68±0.00	0.62±0.01	0.50±0.00	0.53±0.00	0.65±0.00
	DeepConvNet+LSTM	0.30	0.35	0.30±0.12	0.36±0.10	0.30±0.15	0.33±0.13	0.26±0.05	0.27±0.05	0.30±0.07	0.35±0.07
	ShallowConvNet+LSTM	0.28	0.30	0.26±0.06	0.27±0.08	0.29±0.09	0.33±0.11	0.25±0.05	0.27±0.05	0.28±0.05	0.30±0.04
	DeepConvNet	0.31	0.33	0.29±0.08	0.30±0.09	0.32±0.15	0.35±0.14	0.33±0.11	0.34±0.12	0.33±0.08	0.25±0.07
	ShallowConvNet	0.32	0.32	0.29±0.10	0.34±0.12	0.35±0.17	0.30±0.10	0.26±0.03	0.30±0.06	0.34±0.07	0.38±0.10
	EEGNet	0.30	0.31	0.28±0.07	0.30±0.07	0.31±0.10	0.31±0.09	0.26±0.05	0.29±0.06	0.34±0.05	0.36±0.06
	Proposed Method	0.24	0.25	0.22±0.04	0.21±0.03	0.26±0.03	0.28±0.04	0.24±0.03	0.26±0.04	0.28±0.04	0.29±0.04
S10	Chance Level	0.31	0.28	0.56±0.00	0.51±0.00	0.56±0.00	0.52±0.00	0.59±0.00	0.94±0.00	0.63±0.01	0.64±0.00
	DeepConvNet+LSTM	0.34	0.34	0.30±0.08	0.29±0.05	0.37±0.10	0.38±0.11	0.27±0.07	0.23±0.10	0.40±0.06	0.38±0.11
	ShallowConvNet+LSTM	0.27	0.26	0.24±0.06	0.25±0.05	0.29±0.06	0.27±0.05	0.26±0.05	0.22±0.09	0.39±0.06	0.36±0.09
	DeepConvNet	0.31	0.28	0.29±0.07	0.27±0.04	0.32±0.08	0.28±0.06	0.35±0.07	0.30±0.03	0.41±0.09	0.42±0.09
	ShallowConvNet	0.31	0.29	0.31±0.08	0.29±0.03	0.31±0.07	0.28±0.07	0.35±0.01	0.37±0.07	0.37±0.07	0.35±0.09
	EEGNet	0.31	0.28	0.30±0.12	0.29±0.04	0.32±0.07	0.27±0.05	0.31±0.06	0.23±0.09	0.38±0.08	0.34±0.07
	Proposed Method	0.24	0.24	0.23±0.04	0.24±0.04	0.25±0.05	0.23±0.05	0.29±0.04	0.22±0.08	0.28±0.07	0.29±0.04
S11	Chance Level	0.27	0.36	0.56±0.01	0.72±0.00	0.56±0.00	0.78±0.00	0.55±0.00	0.51±0.00	0.53±0.00	0.64±0.00
	DeepConvNet+LSTM	0.25	0.31	0.22±0.04	0.30±0.07	0.28±0.04	0.32±0.10	0.29±0.05	0.31±0.05	0.32±0.03	0.33±0.11
	ShallowConvNet+LSTM	0.21	0.26	0.21±0.04	0.27±0.04	0.21±0.04	0.25±0.06	0.30±0.03	0.32±0.03	0.32±0.07	0.32±0.09
	DeepConvNet	0.27	0.36	0.27±0.07	0.34±0.07	0.27±0.05	0.37±0.04	0.31±0.04	0.38±0.08	0.31±0.08	0.29±0.06
	ShallowConvNet	0.23	0.29	0.23±0.05	0.29±0.06	0.22±0.04	0.29±0.07	0.32±0.06	0.33±0.05	0.35±0.09	0.35±0.04
	EEGNet	0.22	0.29	0.22±0.04	0.30±0.06	0.22±0.04	0.28±0.07	0.31±0.06	0.33±0.07	0.33±0.05	0.31±0.07
	Proposed Method	0.21	0.25	0.20±0.04	0.25±0.03	0.22±0.04	0.25±0.04	0.28±0.03	0.31±0.04	0.27±0.01	0.26±0.02
S12	Chance Level	0.21	0.28	0.50±0.00	0.54±0.01	0.51±0.00	0.52±0.00	0.57±0.00	0.54±0.00	0.55±0.00	0.59±0.00
	DeepConvNet+LSTM	0.20	0.26	0.20±0.03	0.27±0.04	0.20±0.03	0.24±0.03	0.29±0.05	0.37±0.10	0.36±0.05	0.41±0.07
	ShallowConvNet+LSTM	0.19	0.26	0.19±0.03	0.28±0.04	0.18±0.02	0.24±0.04	0.28±0.03	0.35±0.04	0.31±0.05	0.33±0.05
	DeepConvNet	0.21	0.28	0.21±0.02	0.29±0.03	0.20±0.02	0.26±0.03	0.30±0.03	0.34±0.04	0.36±0.09	0.41±0.10
	ShallowConvNet	0.20	0.27	0.20±0.04	0.29±0.05	0.20±0.03	0.25±0.04	0.31±0.06	0.38±0.07	0.32±0.03	0.36±0.06
	EEGNet	0.22	0.31	0.22±0.02	0.33±0.07	0.21±0.03	0.28±0.05	0.35±0.08	0.39±0.07	0.36±0.07	0.38±0.06
	Proposed Method	0.19	0.25	0.19±0.02	0.25±0.03	0.19±0.01	0.25±0.03	0.32±0.07	0.17±0.08	0.31±0.04	0.33±0.05
S13	Chance Level	0.32	0.38	0.67±0.00	0.69±0.00	0.67±0.01	0.76±0.01	0.72±0.00	0.63±0.00	0.59±0.00	0.70±0.00
	DeepConvNet+LSTM	0.28	0.30	0.27±0.04	0.30±0.02	0.29±0.03	0.30±0.02	0.36±0.07	0.40±0.06	0.37±0.06	0.42±0.08
	ShallowConvNet+LSTM	0.33	0.33	0.40±0.02	0.36±0.04	0.26±0.06	0.30±0.05	0.35±0.06	0.35±0.07	0.35±0.05	0.38±0.07
	DeepConvNet	0.32	0.38	0.29±0.06	0.36±0.09	0.34±0.07	0.39±0.08	0.36±0.08	0.42±0.04	0.38±0.07	0.43±0.08
	ShallowConvNet	0.30	0.36	0.29±0.09	0.37±0.00	0.31±0.09	0.34±0.02	0.40±0.03	0.40±0.01	0.41±0.09	0.47±0.06
	EEGNet	0.29	0.37	0.27±0.05	0.36±0.04	0.30±0.07	0.38±0.02	0.39±0.05	0.39±0.07	0.45±0.08	0.51±0.09
	Proposed Method	0.28	0.28	0.23±0.04	0.28±0.04	0.33±0.05	0.28±0.03	0.36±0.06	0.37±0.07	0.39±0.05	0.38±0.07